



Facultad de Ingeniería

Trabajo de Investigación

“Estudio de los Armónicos y sus efectos en los Transformadores de Potencia”

Autores: Denys Orlando Fabian Malvaceda - 1410462
Raúl Christian Palián Flores - 1420709

Para obtener el Grado de Bachiller en:
Ingeniería Eléctrica y de Potencia

Lima, abril de 2019

RESUMEN

Este trabajo de investigación consiste en el estudio y la revisión de la información bibliográfica acerca de los armónicos y como interactúan con los transformadores de potencia de media tensión. Preliminarmente, se explicó como los armónicos son originados por cargas no lineales que generan distorsión y como esta distorsión altera y perturba el funcionamiento del transformador, por ende, disminuye su vida útil. Luego, se analizó las fuentes que generan armónicos y sus efectos en el comportamiento de los transformadores. Finalmente se revisó el estudio hecho por la compañía ABB para el dimensionamiento de los transformadores sometidos a la presencia de armónicos. En donde proponen parámetros de diseño y la utilización de materiales para su elaboración, con la finalidad de disminuir las afectaciones, que reducen su vida útil.

DEDICATORIA

A nuestra querida institución por la
formación brindada y cada uno de
nuestros profesores que formaron
parte de este camino hacia nuestro
objetivo académico.

AGRADECIMIENTOS

A nuestros queridos padres por el incansable apoyo en nuestra formación profesional durante estos largos años de estudio. A nuestros profesores y compañeros de aulas por compartir gratos momentos en nuestro aprendizaje.

INDICE

CAPITULO 1	2
ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION	2
1.1 Planteamiento del Problema	2
1.2 Definición de Objetivos	3
1.2.1 Objetivo General	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
1.3 Alcances de la investigación	4
1.4 Justificación	5
CAPITULO 2	6
MARCO TEÓRICO	6
2.1 Fundamento Teórico	6
2.1.1 Transformadores	6
2.1.2 Principios de operación de un transformador	17
2.1.3 Perdidas en los transformadores	19
2.1.4 Circuito equivalente de un transformador	21
2.1.5 Transformadores de Potencia en el SEIN	22
2.1.6 Las cargas lineales y las cargas no lineales	23
2.1.7 Los armónicos eléctricos	25
2.1.8 La distorsión armónica y sus características	26
2.1.9 Normas y limites	27
2.1.10 Medición de la distorsión armónica	30
2.1.11 Indicadores de THD	31
2.1.12 La resonancia	33
2.2 Problemas similares y análisis de soluciones	34
2.2.1 Efecto en los sistemas de potencia	34
2.2.2 Efecto en los transformadores de potencia de M.T.	35
2.2.3 Efecto en los bancos de capacitores	37
2.2.4 Efecto en los cables	38
2.2.5 Efecto en los conductores neutros	40
2.2.6 Efecto en los motores	41
2.3 Técnicas de sustento	42
2.3.1 Técnica en los transformadores	42
2.3.2 Técnica en los bancos de capacitores	43
2.3.3 Técnica en los cables	44
2.3.4 Técnica en los conductores neutros	45
2.3.5 Técnica en los motores y generadores	46
CAPITULO 3	48
PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN	48

3.1	Análisis de los armónicos	48
3.1.1	Modelos de los componentes para el flujo de armónicos.....	48
3.1.2	Fuentes de armónicos	52
3.1.3	Atenuación de los armónicos en los transformadores de potencia	53
3.2	Factor K.....	54
3.3	Materiales utilizados.....	55
3.4	Pruebas de contraste en un transformador.....	56
CAPITULO 4		61
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS LA INVESTIGACIÓN		61
4.1	Dimensionamiento de transformadores expuestos a armónicos	61
4.1.1	Cálculo del factor K	61
4.1.2	Consideraciones del diseño del núcleo bajo carga de armónicos.....	65
4.1.3	Consideraciones del diseño de las bobinas bajo carga de armónicos.....	66
4.1.4	Consideraciones del diseño de los neutros bajo carga de armónicos	67
4.1.5	Consideraciones del diseño de la pantalla electrostática.....	68
CONCLUSIONES.....		70
BIBLIOGRAFIA		72
ANEXO 1		
ANEXO 2		

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1:</i> Árbol de problemas de la investigación. <i>Fuente:</i> Propia	3
<i>Figura 2.</i> Dibujo de Michael Faraday en su diario de 1831. <i>Fuente:</i> (L. M. Barrios, 1994, p.187). ..	7
<i>Figura 3.</i> Bobina empleada por Faraday. <i>Fuente:</i> (Politécnico de Torino, 1990, p.189)	7
<i>Figura 4.</i> Generador Secundario de Gaulard y Gibbs. <i>Fuente:</i> (Politécnico de Torino, 1990)	7
<i>Figura 5.</i> Esquema de un transformador monofásico. <i>Fuente:</i> Propia.	9
<i>Figura 6.</i> Esquema de un transformador trifásico. <i>Fuente:</i> Propia.	9
<i>Figura 7.</i> Núcleos tipo columna. <i>Fuente:</i> (Harper, 2005, p.55).....	10
<i>Figura 8.</i> Núcleo tipo acorazado. <i>Fuente:</i> (Harper, 2005, p.56)	10
<i>Figura 9.</i> Tipos de núcleo. <i>Fuente:</i> Adaptado de INDUCOR	11
<i>Figura 10.</i> Transformador tipo poste. <i>Fuente:</i> (QUANTUM 2018).....	11
<i>Figura 11.</i> Transformador tipo estación. <i>Fuente:</i> (ECUATRAN 2018).....	11
<i>Figura 12.</i> Transformador tipo pedestal. <i>Fuente:</i> (DINAMIK 2018)	12
<i>Figura 13.</i> Transformador tipo bóveda. <i>Fuente:</i> (DINAMIK 2018)	12
<i>Figura 14.</i> Partes un transformador. <i>Fuente:</i> (Enríquez, 2005, p.133).....	16
<i>Figura 15.</i> Transformador con secundario abierto. <i>Fuente:</i> (Avelino, 2001, p.22)	17
<i>Figura 16.</i> Variación del flujo con respecto al tiempo. <i>Fuente:</i> (Avelino, 2001, p.23).....	18
<i>Figura 17.</i> Ciclo de Histéresis. <i>Fuente:</i> (Valencia, 2010).....	20
<i>Figura 18.</i> Corrientes de Eddy. <i>Fuente:</i> (Valencia, 2010).....	21
<i>Figura 19.</i> Circuito equivalente de un transformador. <i>Fuente:</i> (Martínez J.,2011, p.96)	21
<i>Figura 20.</i> Partes de un sistema de potencia. <i>Fuente:</i> (Baldeón J., 2018, p.4)	22
<i>Figura 21.</i> Ubicación de los transformadores de potencia. <i>Fuente:</i> (Avelino, 2001, p.4)	23
<i>Figura 22.</i> Curva lineal de impedancia. <i>Fuente:</i> (Téllez, 2000, p.7)	24
<i>Figura 23.</i> Curva distorsionada de impedancia. <i>Fuente:</i> (Téllez, 2000, p.7)	25
<i>Figura 24.</i> Función y sus componentes armónicas. <i>Fuente:</i> (Universidad Michoacana, 2003, p.35)	26
<i>Figura 25.</i> Transitorio en la conmutación de condensadores. <i>Fuente:</i> (Téllez, 2000, p.3).....	26
<i>Figura 26.</i> Forma de onda de corriente en variador de velocidad. <i>Fuente:</i> (Téllez, 2000, p.3)	27
<i>Figura 27.</i> Medición según norma IEEE 519-1992. <i>Fuente:</i> (Téllez, 2000, p.16).....	31
<i>Figura 28.</i> Triángulo de potencias. <i>Fuente:</i> (Atalaya, 2010, p.13).....	31
<i>Figura 29.</i> Compensación del factor de potencia. <i>Fuente:</i> (FULLWAT, 2018)	32
<i>Figura 30.</i> Pirámide de potencias. <i>Fuente:</i> (Téllez, 2000, p.10)	32
<i>Figura 31.</i> Resonancia en serie y paralelo. <i>Fuente:</i> (Téllez, 2000, p.12).	34
<i>Figura 32.</i> Problemas principales de una red eléctrica. <i>Fuente:</i> (CIRCUITOR, 2018)	35
<i>Figura 33.</i> Efecto piel o efecto piel. <i>Fuente:</i> (ISSUU, 2017)	37
<i>Figura 34.</i> Cable unipolar. <i>Fuente:</i> (CENTELSA, 2018, p.106).....	38
<i>Figura 35.</i> Cable tripolar. <i>Fuente:</i> (CENTELSA, 2018, p.114).....	38

<i>Figura 36. Partes de un cable de M.T. Fuente: (CENTELSA, 2018, p.98)</i>	38
<i>Figura 37. Relación X_s vs frecuencia. Fuente: (Iñaki, 2015, p.2)</i>	39
<i>Figura 38. Armónicos de 3er orden en el neutro. Fuente: (Iñaki, 2015, p.3)</i>	40
<i>Figura 39. Desclasificación de la capacidad de carga en función del factor k. Fuente: (ISEESAC, 2019)</i>	42
<i>Figura 40. Factor de desclasificación de transformadores para carga tipo K13. Fuente: (ISEESAC, 2019)</i>	43
<i>Figura 41. Factores de reducción vs % de intensidad armónica. Fuente: (Electriaplicada, 2017)</i> .	45
<i>Figura 42. Neutro sobredimensionado en su doble. Fuente: (Iñaki, 2015, p.2)</i>	46
<i>Figura 43. Generación de un circuito limpio a partir de uno deformado. Fuente: (AESOLUCIONES, 2018)</i>	47
<i>Figura 44. Modelo equivalente de maquina síncrona. Fuente: (Atalaya, 2010, p.23)</i>	49
<i>Figura 45. Modelo equivalente de transformador. Fuente: (Atalaya, 2010, p.23)</i>	50
<i>Figura 46. Modelo equivalente de un motor. Fuente: (Atalaya, 2010, p.23)</i>	50
<i>Figura 47. Modelo equivalente de líneas y cables. Fuente: (Atalaya, 2010, p.24)</i>	51
<i>Figura 48. Diagrama de bloques de un variador. Fuente: (Atalaya, 2010, p.29)</i>	52
<i>Figura 49. Transformador de prueba. Fuente: (UCSA, 2014)</i>	57
<i>Figura 50. Promedio de temperatura con carga lineal. Fuente: (UCSA, 2014)</i>	58
<i>Figura 51. Temperatura del transformador por zonas 1. Fuente: (UCSA, 2014)</i>	58
<i>Figura 52. Promedio de temperatura para carga no lineal. Fuente: (UCSA, 2014)</i>	59
<i>Figura 53. Temperatura del transformador por zonas 2. Fuente: (UCSA, 2014)</i>	59
<i>Figura 54. Hoja de cálculo para dimensionar el núcleo. Fuente: (ABB, 2005)</i>	65
<i>Figura 55. Aislamiento extendido para bobinas. Fuente: (ABB, 2005)</i>	66
<i>Figura 56. Hoja de cálculo para dimensionamiento de bobinas. Fuente: (ABB, 2005)</i>	67
<i>Figura 57. Ubicación de la pantalla electrostática. Fuente: (ABB, 2005)</i>	69
<i>Figura 58. Falla en la pantalla electrostática. Fuente: (ABB, 2005)</i>	69
<i>Figura 59. Diagrama unifilar del SEIN. Fuente: (COES, 2018)</i>	
<i>Figura 60. Sistema interconectado nacional. Fuente: (COES, 2017)</i>	

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Perdidas en acero al silicio.....	14
Tabla 2 Pérdidas en los transformadores.....	19
Tabla 3 Tolerancia de armónicos según la NTCSE	28
Tabla 4 Límites de Distorsión Armónica en Voltaje.....	28
Tabla 5 Límites de Distorsión Armónica en Corriente	29
Tabla 6 Fallas de transformadores de potencia de la CFE en 1999.	36
Tabla 7 Efectos de los armónicos.	41
Tabla 8. Características de los convertidores.	53
Tabla 9 Tabla de valores de factor K comerciales	55
Tabla 10 Tabla de propiedades del aluminio y el cobre.	56
Tabla 11 Características del transformador	57
Tabla 12 Resultado de la prueba con carga lineal	58
Tabla 13 Resultado de la prueba con carga no lineal	59
Tabla 14 Comparación de temperaturas según la carga	60
Tabla 15 Cargas con Factor K.....	62
Tabla 16 Factor K según carga.	63
Tabla 17 Tabla de armónicos vs corriente nominal.....	64

INTRODUCCION

Los transformadores son considerados los elementos más costosos e importantes de los circuitos eléctricos. Por ello el dimensionamiento adecuado, el mantenimiento preventivo y las pruebas de rutina, son necesarios para su buen funcionamiento y conservación en el tiempo. La impedancia no constante (cargas no lineales), genera distorsión en la onda senoide de la diferencia de potencial eléctrico, generando un ingreso de armónicos al sistema. Un ejemplo recurrente se aprecia en los dispositivos electrónicos que utilizan fuentes rectificadoras de alterna a continua, las cuales cargan y descargan condensadores que provocan crestas puntiagudas deformando la onda de la corriente.

La investigación ingenieril frente a este problema determina, que el diseño de los transformadores debe darse considerando densidades de corriente de modo que se evite la expansión de pérdidas de Eddy y el efecto piel. Asimismo, la utilización de materiales con características mejoradas que produzcan menor calentamiento en las bobinas, así como métodos de refrigeración y métodos de compensación de armónicos. A continuación, se expone una síntesis de conceptos acerca de los armónicos, como interactúan con los transformadores de potencia y el dimensionamiento para evitar sus efectos.

CAPITULO 1

ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION

En el Capítulo 1 de este trabajo se hará la definición del problema que motivo la investigación y se definirán los objetivos trazados.

1.1 Planteamiento del Problema

Cada vez se utilizan más equipos electrónicos y esto origina la presencia de “Distorsión armónica” en los circuitos eléctricos. Los armónicos producen diferentes efectos que reducen la eficiencia de muchos dispositivos conectados a la red eléctrica. En los transformadores producen ruido y calentamiento excesivo, lo que disminuye su vida útil.

Los transformadores que son expuestos a cargas armónicas elevan su temperatura durante su funcionamiento de forma desproporcional a la carga que alimenta. Para para el diseño de los transformadores es necesario considerar los armónicos que estarán presentes durante su vida útil, para obtener un funcionamiento adecuado y avalado por el fabricante.

Por lo tanto, teniendo las causa y efectos que producen los armónicos en los transformadores de potencia, se hizo la identificación del problema principal.

La descripción y formulación, así como también la identificación del problema principal se logrará a partir de la técnica del árbol de problemas.



*Figura 1: Árbol de problemas de la investigación.
Fuente: Propia*

Por lo expuesto anteriormente, se reconoce como causas de la deficiencia de los transformadores de potencia debido a los armónicos, principalmente a las cargas no lineales, la saturación de los núcleos magnéticos y el suministro conmutado. Los efectos de esta problemática se mencionan en la *Figura 1* y destaca en importancia el sobrecalentamiento debido a las pérdidas en el núcleo y las bobinas.

En conclusión, después de utilizado la técnica del árbol de problemas se identificó el problema principal como: La deficiencia en los transformadores de potencia de media tensión, debido a la interacción con los armónicos eléctricos.

1.2 Definición de Objetivos

Seguidamente se presenta el objetivo general y luego los objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo General

- La concientización del efecto causado por los armónicos eléctricos a los transformadores de potencia de media tensión (M.T.) y la consideración que debe tenerse en cuenta para el diseño y el requerimiento de los mismos con la finalidad de contrarrestar dichos efectos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudiar e identificar los armónicos presentes en las redes de distribución los cuales afectan la vida útil de los transformadores de potencia de M.T.
- Dimensionar el transformador teniendo en cuenta los valores de distorsión de armónicos.
- Estudiar la técnica que se aplica en el diseño de los transformadores de potencia de M.T. para mitigar el efecto de los armónicos.

1.3 Alcances de la investigación

- Se definirá los conceptos de mayor importancia sobre la distorsión armónica, para luego entender su interacción con los transformadores de potencia de M.T.
- Encontrar las causas y los efectos de la distorsión armónica en diferentes dispositivos eléctricos, principalmente en los transformadores de potencia de M.T.
- Se investigará sobre la problemática de los transformadores de potencia frente a los armónicos eléctricos.
- Se recopilará los métodos utilizados en la actualidad para menguar el efecto negativo de la distorsión armónica en los transformadores de potencia de M.T.
- Los transformadores que forman parte de esta investigación tienen una potencia superior a los 500kVA y operan con tensión de hasta 36kV. Por ello, se les considera de potencia y media tensión.

1.4 Justificación

La distorsión armónica generada por las cargas no lineales, en los circuitos eléctricos, genera un gran problema tanto para el consumidor, como para el proveedor de electricidad. El calentamiento de los componentes del circuito eléctrico y los costos operativos se incrementan provocando pérdidas materiales y económicas.

Este trabajo se justifica en la necesidad de estudiar y considerar los efectos de los armónicos en el requerimiento y diseño de los transformadores, para proporcionar un buen funcionamiento y alcanzar la vida útil estimada.

Los armónicos se encuentran presentes en las afectaciones de disminución de la vida útil del transformador por sobrecalentamientos de las bobinas, perdidas por histéresis y Foucault, sobredimensionamiento y saturación del transformador, perdidas de rendimiento.

Por lo tanto, este trabajo busca concientizar la consideración en el requerimiento y diseño de los transformadores de potencia de M.T. para mitigar el efecto de la distorsión armónica.

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Fundamento Teórico

En este capítulo se hace una revisión breve de los conceptos más importantes sobre los armónicos eléctricos y los transformadores de potencia de M.T., con la necesidad de fundamentar teóricamente la investigación realizada en este trabajo. Si el lector se encuentra familiarizado con estos conceptos, puede tomarse la libertad de saltar este capítulo.

2.1.1 Transformadores

Michael Faraday fue quien construyó el primer transformador en 1831, utilizando una bobina de inducción, la cual consistía en un toroide de hierro con conductores alrededor en forma de espiras como se aprecia en la Figura 2. Esos conductores estaban alimentados por una corriente discontinua, pero periódica y posteriormente se utilizó para aumentar la tensión pulsante en los circuitos de telefonía.

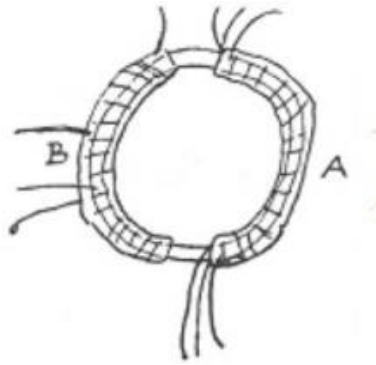


Figura 2. Dibujo de Michael Faraday en su diario de 1831.
Fuente: (L. M. Barrios, 1994, p.187).



Figura 3. Bobina empleada por Faraday.
Fuente: (Politécnico de Torino, 1990, p.189)

Gaulard y Gibbs fabricaron comercialmente el primer transformador de corriente alterna en el año 1882. Esta innovación abrió la posibilidad de transmitir la energía eléctrica grandes distancias y fue bautizado como “Generador secundario”, como se aprecia en la Figura 4.



Figura 4. Generador Secundario de Gaulard y Gibbs.
Fuente: (Politécnico de Torino, 1990)

2.1.1.1 Generalidades

Se entiende por transformador a una máquina estática de inducción electromagnética cuyo principio de funcionamiento es la transferencia de la energía eléctrica entre dos o más circuitos, cuyo nexo es un flujo común de inducción.

Si la alimentación del transformador es mediante corriente directa, el flujo será pulsante y la utilización será más específica con tendencia a ser aparatos de potencia muy reducida. Por otro lado, cuando la alimentación es mediante corriente alterna el aparato es apto para trabajar con potencias muy elevadas.

Normalmente, se utiliza la corriente alterna en los sistemas de potencia, siendo la corriente directa la más utilizada en los usuarios finales. Esto se debe principalmente a los sobrecostos que generaría transmitir corriente directa hasta determinada potencia. Se calcula que a partir de los 800kV DC, sería rentable transmitir en DC.

2.1.1.2 Clasificación y utilización

La clasificación se puede dar bajo diferentes criterios los cuales se pasará a mencionar: según su tipo de operación, según su número de fases, según su posición dentro del sistema, según la forma del núcleo, según las condiciones de servicio, según sus lugares de instalación, según su tipo de refrigeración.

a) Se puede distinguir 2 clases de transformadores, según su operación:

- Los transformadores de distribución, cuya potencia es inferior a los 300kVA (Camarena, 1980, p. 16) y 500kVA (Avelino, 2001, p. 5).
 - Los transformadores de potencia o fuerza, los cuales poseen elevados voltajes y potencias muy grandes y se encuentran en las estaciones o subestaciones de energía.
- Por lo dicho en el párrafo anterior, se sobreentiende que se considera como

transformadores de potencia a aquellos cuya potencia es superior a los 500kVA, no existiendo un límite superior en cuanto a potencia.

b) Los transformadores según el sistema eléctrico que los alimenta comúnmente son:

- Monofásicos, que se conectan a una línea y un conductor neutro (L-N) o una línea y una tierra (L-T).

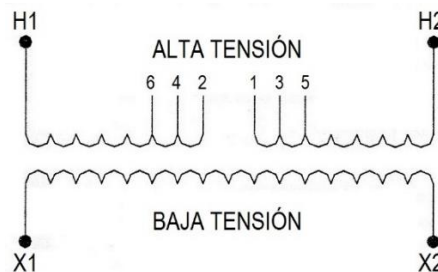


Figura 5. Esquema de un transformador monofásico.
Fuente: Propia.

- Trifásicos, que son instalados a 3 líneas, también pueden estar o no instalados a un neutro común o también a una tierra.

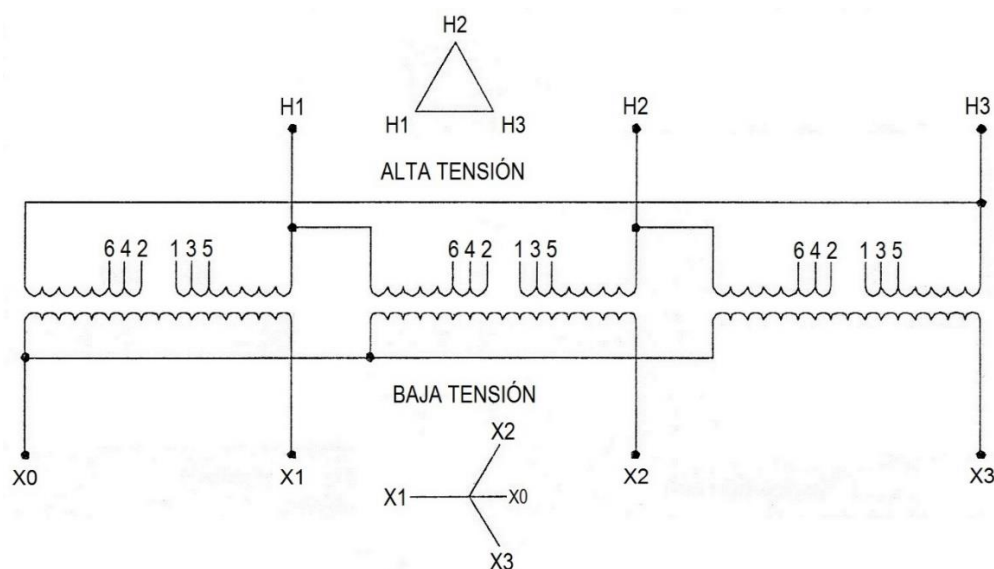


Figura 6. Esquema de un transformador trifásico.
Fuente: Propia.

Pero puede haber casos especiales como por ejemplo los transformadores hexafásicos.

c) Los transformadores de acuerdo a su utilización pueden ser:

- El transformador de potencia conectado a la salida del generador eléctrico de una central.
- El transformador de potencia de subestación; conectado al final del circuito en la línea de transmisión reduciendo la tensión en la subtransmisión.
- El transformador de potencia en industrias; conectado al final de la línea de subtransmisión reduciendo la tensión para el consumo.
- Los transformadores de potencia especiales; para regular la tensión, para rectificar, para desfasar, para medición, el autotransformador, etc.

d) Los transformadores de acuerdo a la forma del núcleo pueden ser:

- Transformadores de núcleo tipo columna.

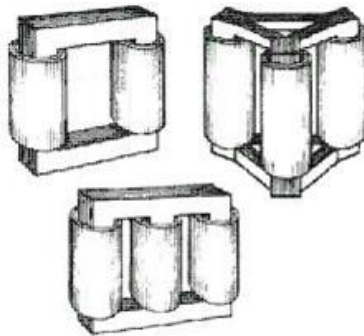


Figura 7. Núcleos tipo columna.

Fuente: (Harper, 2005, p.55)

- Transformador de núcleo tipo acorazado.

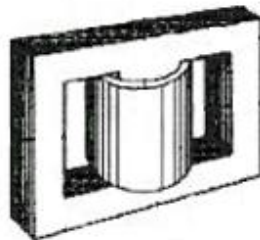







Figura 8. Núcleo tipo acorazado.

Fuente: (Harper, 2005, p.56)

	MONOFASICO		TRIFASICO		
KFAS	1		3		
Tipo de núcleo	1	3	1	3	5
					
	columnas	acorazado	columnas	acorazado	5 columnas

*Figura 9. Tipos de núcleo.
Fuente: Adaptado de INDUCOR*

e) Los transformadores de acuerdo a su lugar de instalación pueden ser:

- Transformador tipo poste



*Figura 10. Transformador tipo poste.
Fuente: (QUANTUM 2018)*

- Transformador tipo subestación



*Figura 11. Transformador tipo estación.
Fuente: (ECUATRAN 2018).*

- Transformador tipo pedestal



*Figura 12. Transformador tipo pedestal.
Fuente: (DINAMIK 2018)*

- Transformador tipo bóveda (sumergible)



*Figura 13. Transformador tipo bóveda.
Fuente: (DINAMIK 2018)*

f) Los transformadores de acuerdo a las condiciones de servicio:

- Transformador para uso en la intemperie; como son: los de tipo estación, los de tipo poste y los de tipo pedestal.
- Transformador para uso interior; como son: los de tipo bóveda, los el tipo resinado y los de tipo encapsulado.

g) Los transformadores de acuerdo al voltaje en el devanado secundario

- Transformador de tipo reductor
- Transformador de tipo elevador

h) Los transformadores según su refrigeración.

Para los transformadores inmersos en aceite dieléctrico:

- Transformador tipo OA: Inmerso en aceite y enfriamiento por ventilación de aire en forma natural.
- Transformador tipo OA/FA: Inmerso en aceite y enfriamiento por ventilación de aire forzado.
- Transformador tipo OA/FA/FOA: Inmerso en aceite y enfriamiento por ventilación de aire forzado y recirculación de aceite forzado.
- Transformador tipo FOA: Inmerso en aceite con intercambiadores de calor para el aceite forzado y con enfriamiento de aire forzado.
- Transformador tipo OW: Inmerso en aceite y enfriamiento con agua.
- Transformador tipo FOW: Inmerso en aceite y enfriamientos con aceite forzado y con enfriadores de agua forzada

Para los transformadores secos:

- Transformador tipo AA: Enfriamiento natural por el paso del aire.
- Transformador tipo AFA: Enfriamiento con aire forzado.
- Transformador tipo AA/FA: Enfriamiento natural por el paso del aire y por ventilación forzada con un controlador automático.

2.1.1.3 Componentes

Los transformadores poseen 4 partes principales y son las siguientes:

a) Circuito eléctrico: Propiamente se refiere a las bobinas primarias y secundarias, las cuales son de cobre o aluminio. La función de la bobina primaria es inducir una fuerza electromotriz en las bobinas secundarias mediante un flujo magnético y con la menor cantidad de pérdidas. Actualmente es el aluminio quien prevalece en la construcción de las

bobinas frente al cobre y esto se debe a su menor costo, teniendo en cuenta que es el cobre tiene menor resistencia específica.

- Los devanados hechos de cobre poseen mejor resistencia estructural y su conducción eléctrica es mejor lo que conlleva a bobinados más pequeños.
- Las bobinas de aluminio tienen considerablemente una reducción en el peso de los transformadores y disipan eficientemente el calor. Lo más relevante del aluminio es el precio del material.

b) Circuito magnético: Es la parte que se refiere al núcleo del transformador; el cual está constituido por varias láminas de fierro silicoso de grano orientado caracterizado por tener perdidas muy bajas y una alta permeabilidad magnética. Estas láminas llevan en sus superficies un aislante de origen inorgánico conocido como “carlite”. En la Tabla 1 se aprecia los tipos de acero utilizados y sus pérdidas.

Tabla 1
Perdidas en acero al silicio

GRADO DE ORIENTACION	ESPESOR Pulg. mm.		60 Hz				50 Hz			
			WATTS POR Lb		WATTS POR Kg		WATTS POR Lb		WATTS POR Kg	
			15kGauss	17kGauss	15kGauss	17kGauss	15kGauss	17kGauss	15kGauss	17kGauss
M-2	0.007	0.18	0.42	-	0.93	-	0.32	-	0.70	-
M-3	0.009	0.23	0.46	-	1.01	-	0.35	-	0.77	-
M-4	0.011	0.28	0.51	0.74	1.12	1.63	0.39	0.56	0.85	1.24
M-6	0.014	0.35	0.66	0.94	1.46	2.07	0.50	0.71	1.11	1.57

Se puede comparar las pérdidas en las láminas de 50Hz y las láminas de 60Hz, con la siguiente relación: $\text{Pérdidas a 50Hz} = 0.76 \times \text{pérdidas a 60Hz}$. Fuente: (Avelino, 2001, p.11)

c) Aislamiento: Es el medio mecánico que conserva las distancias de los conductores. De esta manera, aísla las bobinas entre ellas y también a tierra, las partes próximas al núcleo y al acero de la cuba. Se distingue cuatro funciones importantes:

- ✓ Soportar tensiones altas en el servicio normal, en ondas de impulso y transitorios.

- ✓ Soportar esfuerzos térmicos y mecánicos, principalmente en aquellos que sobrevienen en un cortocircuito.
- ✓ Prevenir la acumulación de calor en exceso.
- ✓ Mantener las condiciones operativas para el periodo estimado de vida útil teniendo en cuenta un mantenimiento adecuado.

Los materiales que comúnmente son utilizados en la construcción de los transformadores son: Cartón prensado, papel Kraft, esmaltes, barnices, porcelanas, fibra vulcanizada, algodón, fibra de vidrio, madera, polvo epóxico, fluido líquido dieléctrico.

Cabe mencionar que el último material de la lista se utiliza para sumergir la parte activa del transformador. Cumple 3 propósitos:

- ✓ Dar rigidez dieléctrica
- ✓ Proteger el material aislante
- ✓ Dar refrigeración eficiente

d) Cuba y accesorios: La cuba es la estructura metálica que servirá de envase del transformador y tiene que tener hermetismo con el objetivo de preservar el aceite que se encuentra en su interior. Este caso solo se da en los transformadores inmersos en aceite. Para los transformadores secos se dispone de una cabina con agujeros de ventilación únicamente.

Los accesorios más importantes de un transformador son: Los aisladores de porcelana en alta y baja, el cambiador de taps, los terminales de conexión, las válvulas de muestreo y cambio de aceite, los termómetros, niveles de aceite, relevador Buchholz, ventiladores, etc.

En la Figura 14 apreciamos las partes y accesorios de un transformador.

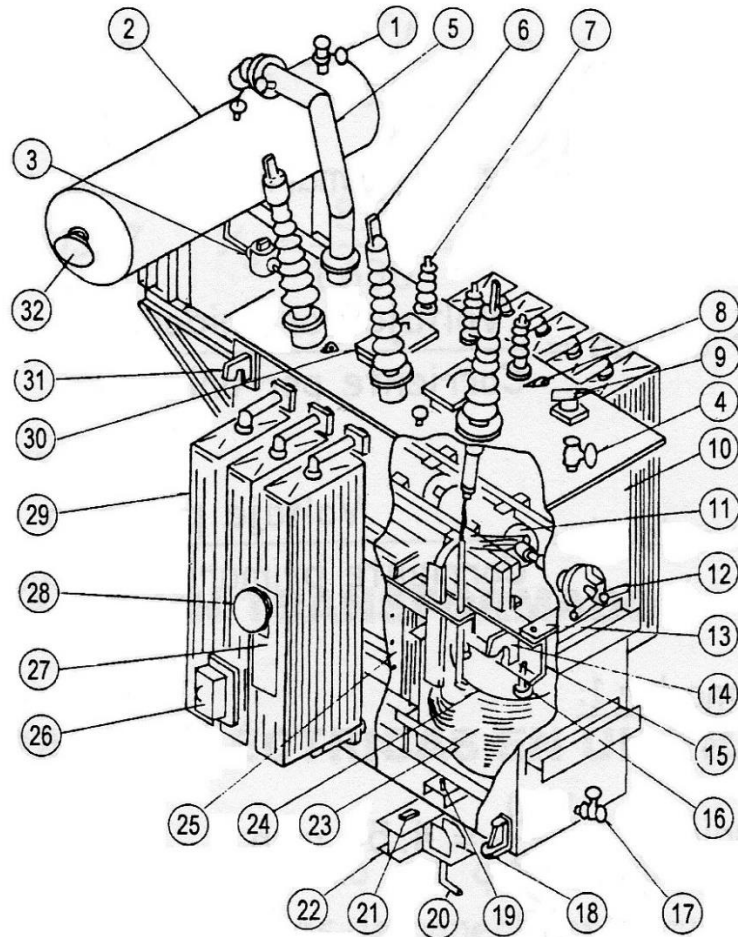


Figura 14. Partes un transformador.

Fuente: (Enríquez, 2005, p.133)

- | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1. Válvula de filtro de aceite | 17. Válvula de drenaje |
| 2. Deposito conservador | 18. Rieles |
| 3. Rele Buchholz | 19. Tope |
| 4. Válvula filtro de aceite | 20. Tornillo de base |
| 5. Ducto a válvula de alivio | 21. Terminal de tierra |
| 6. Aislador AT | 22. Base de apoyo |
| 7. Aislador BT | 23. Devanado |
| 8. Puntos izaje | 24. Placa de presión de bobina |
| 9. Terminación | 25. Núcleo |
| 10. Cuba | 26. Caja de terminales |
| 11. Conmutador | 27. Placa |
| 12. Manija de conmutación | 28. Visor de temperatura |
| 13. Sujeción de núcleo y bobinas | 29. Aletas |
| 14. Gancho de bobinas y núcleo | 30. Visor de inspección |
| 15. Herraje | 31. Gacho de izaje |
| 16. Tornillo de presión de aceite | 32. Visor de nivel de aceite |

2.1.2 Principios de operación de un transformador

La operación de un transformador se da en la interacción entre sus circuito eléctrico y magnético. La transformación de electricidad por inducción electromagnética de una bobina a otra en el mismo circuito magnético se da con gran eficiencia.

La fuerza electromotriz se induce por la variación del flujo magnético con respecto al tiempo.

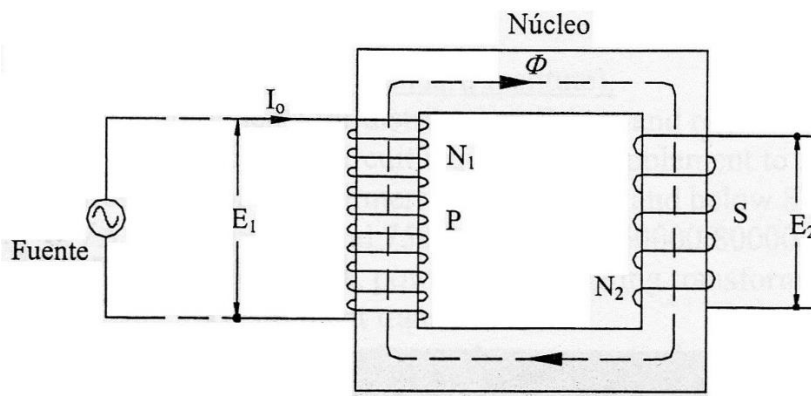


Figura 15. Transformador con secundario abierto.

Fuente: (Avelino, 2001, p.22)

En la Figura 15, observamos que en el lado izquierdo del núcleo tenemos una bobina “P” alimentada por una fuente de corriente alterna. Esto origina una fuerza magneto motriz (f.m.m.) que origina un flujo tal que inducirá una f.e.m. por el lado derecho del núcleo a la bobina “S”. Es entonces que, debido a la f.e.m. originada en “S” es que esta bobina genera una corriente y energía eléctrica.

El flujo en el núcleo es común tanto a la bobina primaria como a la bobina secundaria y se cumple la siguiente relación:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Donde E₁ y E₂ son las f.e.m. inducidas en el primario y el secundario respectivamente y donde N₁ y N₂ son los números de vueltas en el primario y el secundario.

La f.e.m. que es inducida en el transformador es proporcional a la frecuencia, el número de vueltas y el flujo instantáneo máximo Φ_m .

La variación del flujo con respecto al tiempo puede apreciarse en la Figura 16.

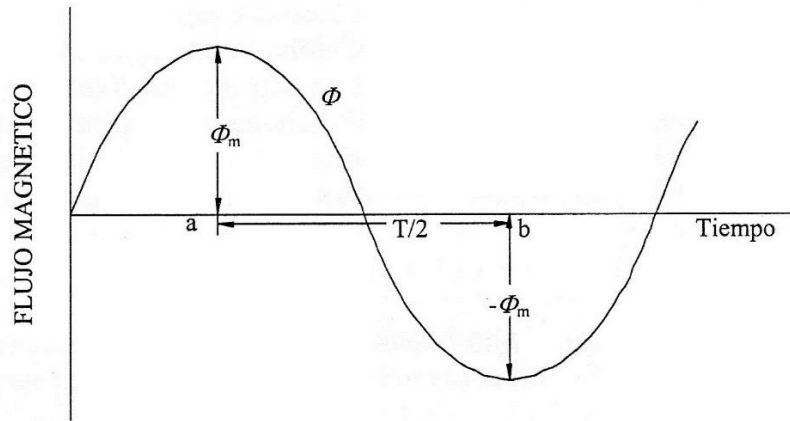


Figura 16. Variación del flujo con respecto al tiempo.

Fuente: (Avelino, 2001, p.23)

La variación total del flujo entre a y b es $2\Phi_m$ Maxwell. La variación tiene una duración de $T/2$ segundos. Por lo tanto:

$$e = -N \frac{2\Phi_m}{T/2} 10^{-8} \text{volts}$$

$$e = -4fN\Phi_m 10^{-8} \text{volts}$$

Considerando que la relación entre el valor eficaz y el valor medio es 1.11:

$$E = 4.44fN\Phi_m 10^{-8} \text{volts}$$

En unidades metro, kilogramo y segundo (mks)

$$E = 4.44fN\Phi_m \text{volts}$$

El flujo máximo es $\Phi_m = B_m A$, donde:

- B_m es la densidad de flujo máximo
- A es la sección transversal del núcleo

Entonces la ecuación general del transformador es:

$$E = 4.44fNB_m A 10^{-8} \text{volts}$$

Esta ecuación se cumple independientemente para cada bobina, es por ello que al dividir las f.e.m. del primario con el secundario nos da como resultado la relación de transformación.

$$a = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

La relación de transformación se considera constante mientras no varíe más allá del 8% y esto va a depender de la carga y el factor de potencia.

2.1.3 Perdidas en los transformadores

Los transformadores son maquina estáticas muy eficientes, pero aun así se han tomado las consideraciones para reducir las pérdidas que se producen tanto en el cobre como en el hierro. En estas máquinas no hay perdidas debido a la rotación, como ocurre en las maquinas rotatorias.

En el cobre de las bobinas se produce las perdidas debido a la resistencia del material por el paso de la corriente, mientras que en el hierro las pérdidas se deben al ciclo de histéresis y las corrientes parasitas o también llamadas corrientes de Eddy.

En la Tabla 2 podemos apreciar las perdidas relacionadas a los transformadores.

Tabla 2
Pérdidas en los transformadores

Perdidas en el cobre	$R_1 I_1^2$ watts
	$R_2 I_2^2$ watts
Perdidas en el hierro	Perdidas por Histéresis
	Perdidas por corrientes de Eddy

Fuente: (Avelino, 2001, p.42)

2.1.3.1 Perdidas por Histéresis

Los ciclos de histéresis son los que corresponden a la imanación y desimanación en forma cíclica por medio de la excitación periódica del núcleo ferromagnético. Existen ciclos de histéresis distintos anchos y va a depender del tipo de material. Para el hierro silicoso el ciclo de histéresis es estrecho y esto hace que el núcleo se magnetice mucho menos que otros materiales. Cuanto mayor sea el ciclo de histéresis mayor magnetización va a adquirir el núcleo y cuanto más se magnetice y desmagnetice mayores pérdidas en calor se van a producir en el núcleo. En la Figura 17 observamos un ciclo de Histéresis.

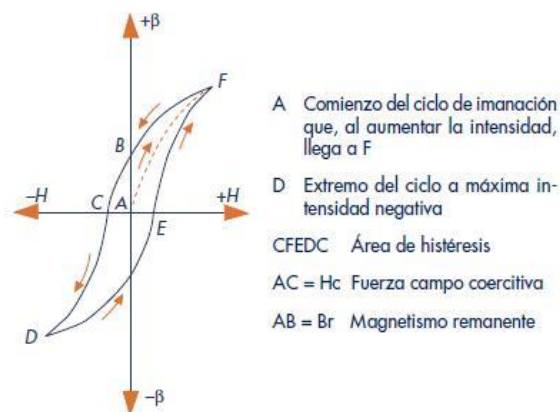


Figura 17. Ciclo de Histéresis.

Fuente: (Valencia, 2010)

2.1.3.1 Perdidas por corrientes de Eddy

El campo magnético origina variaciones con respecto al tiempo, en el núcleo se producen tensiones que dan lugar a corrientes parasitas, también llamadas corrientes de Foucault o corrientes de Eddy. Estas corrientes están siempre asociadas a la resistencia del núcleo y ocasionan pérdidas que pueden reducirse laminando las chapas y aislándolas entre sí. Por eso en los transformadores los núcleos son laminados buscando disminuir estas pérdidas. Si se utilizara un núcleo macizo se producirían pérdidas excesivamente grandes debido a corrientes parasitas lo que provocaría un calentamiento considerable del núcleo aparte de las pérdidas.

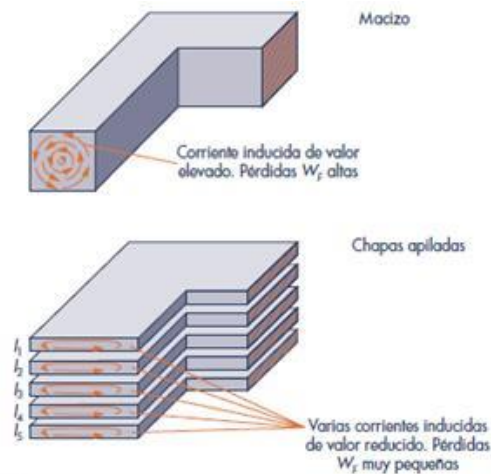


Figura 18. Corrientes de Eddy.
Fuente: (Valencia, 2010)

2.1.4 Circuito equivalente de un transformador

En un transformador se puede representar el circuito eléctrico e incluso sus imperfecciones mediante un circuito adicional insertado entre la fuente y la bobina primaria y entre la bobina del secundario y la carga. En la Figura 19 se aprecia la representación de las bobinas primaria y secundaria del transformador. R_p y R_s representan las resistencias de las bobinas primaria y secundaria respectivamente. L_p y L_s son las reactancias de las bobinas debido a la dispersión del flujo. R_n representa las pérdidas en el núcleo debido a las corrientes de Eddy y L_m representa la reactancia inductiva la cual genera pérdidas debido al ciclo de histéresis.

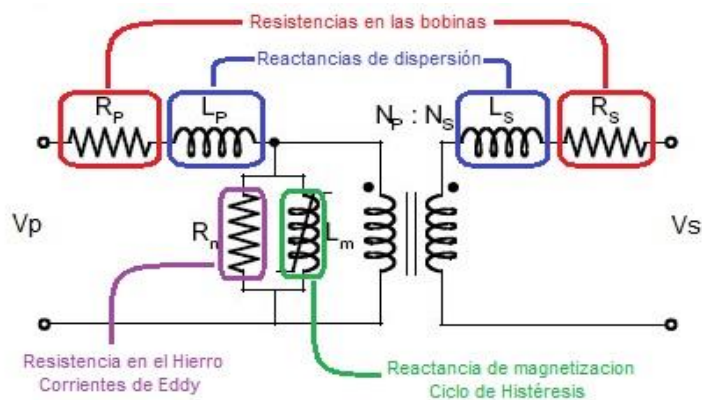


Figura 19. Circuito equivalente de un transformador.
Fuente: (Martínez J., 2011, p.96)

2.1.5 Transformadores de Potencia en el SEIN

Cada vez se utilizan mayores cantidades de energía para abastecer la demanda de consumo eléctrico, domiciliario, comercial e industrial. Por ello la necesidad de transportar gran cantidad de electricidad desde la generación hasta los usuarios finales. Para evitar pérdidas en caídas de tensión se utilizó un principio eléctrico llamado Ley de ohm el cual demuestra que elevando las tensiones se reduce la corriente y se tiene menores perdidas en grandes distancias. Entonces, el objetivo era elevar el voltaje generado en las centrales, transmitirlo a grandes distancias y reducirlo para su consumo. En la Figura 20 se muestra la conformación de un sistema de potencia.

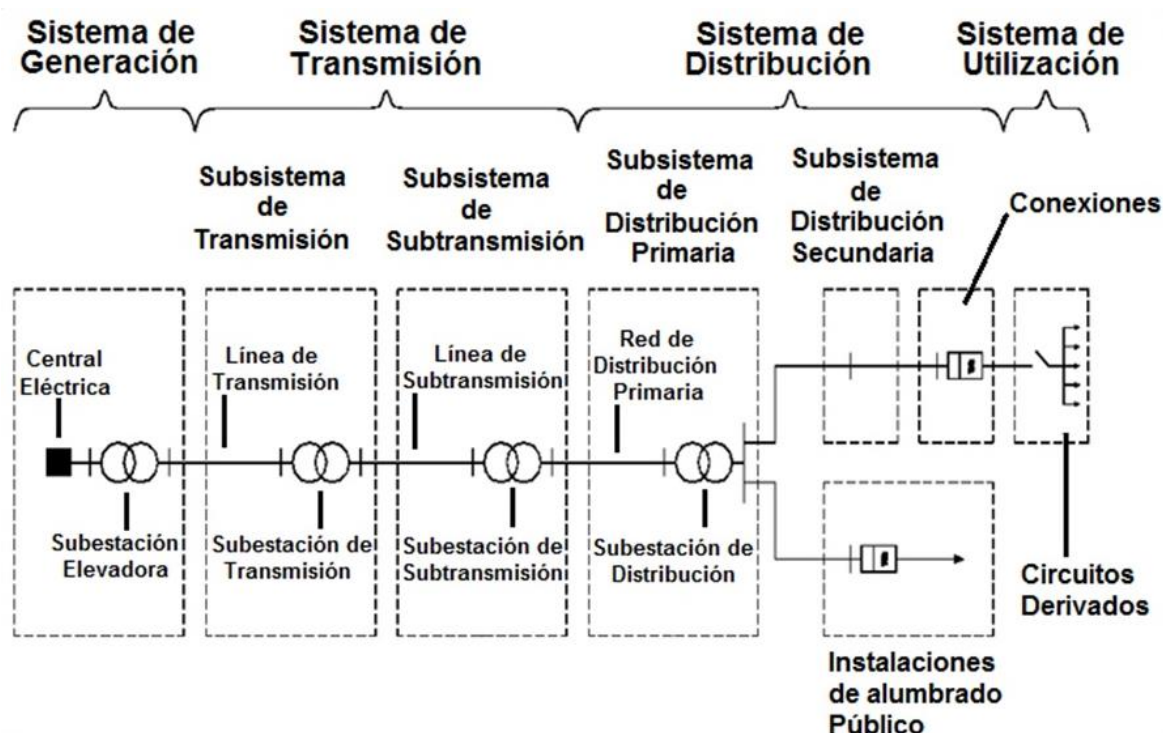


Figura 20. Partes de un sistema de potencia.

Fuente: (Baldeón J., 2018, p.4)

El elevar y reducir el voltaje en ese nivel de potencia es la función de los transformadores de potencia. La necesidad de generar energía conlleva al diseño y construcción de transformadores de mayor potencia, los cuales tienen como única limitación que restringe sus dimensiones, la ubicación y traslado.

Los transformadores de potencia forman parte de un sistema eléctrico de potencia y la ubicación dentro de este se puede apreciar en la Figura 21 donde encerrado en azul apreciamos los transformadores de potencia elevadores; conectados a los generadores de las centrales, en color rojo están encerrados los transformadores de potencia reductores; que son de transición entre la transmisión y la distribución y encerrados en verde los transformadores de potencia de distribución de media tensión, que son los que están siendo considerados en este estudio.

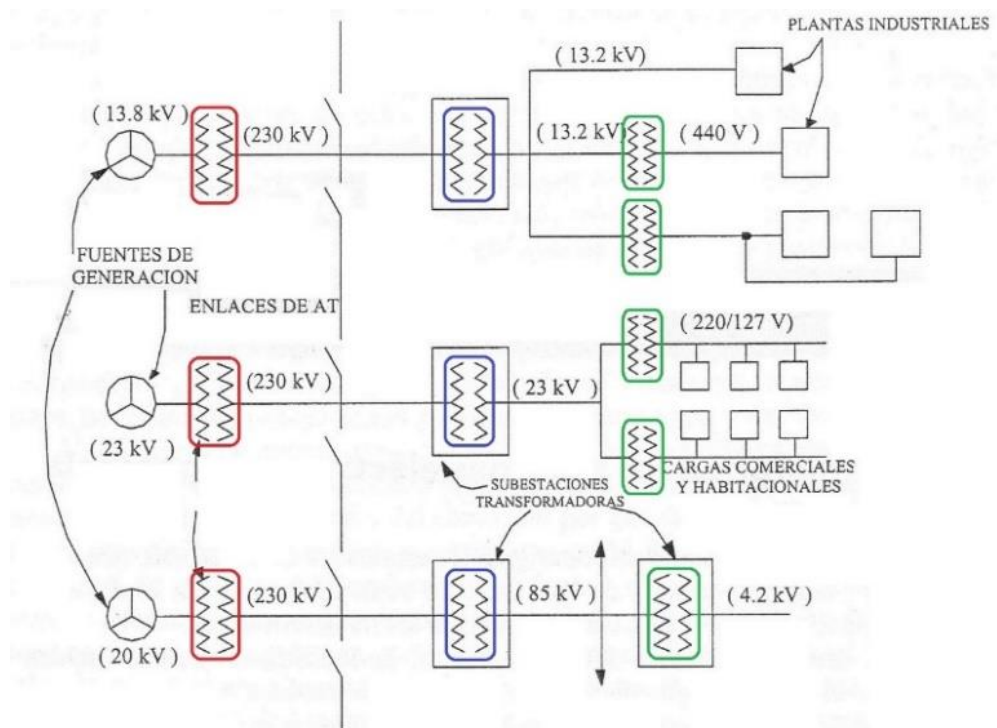


Figura 21. Ubicación de los transformadores de potencia.

Fuente: (Avelino, 2001, p.4)

2.1.6 Las cargas lineales y las cargas no lineales

Los circuitos eléctricos se encuentran conformados por diferentes dispositivos que interactúan entre sí y en algunos casos modifican la forma de que tiene la onda de la fuente de manera lineal y no lineal. En este último caso, origina algunos comportamientos inadecuados que pueden ocasionar serios problemas en los componentes de los circuitos.

“Cuando se aplica un voltaje senoidal directamente a cargas tales como resistencias, inductancias, capacitores o una combinación de ellos, se produce una corriente proporcional que también es senoidal, por lo que se les denominan cargas lineales”. (Téllez, 2000, p.7)

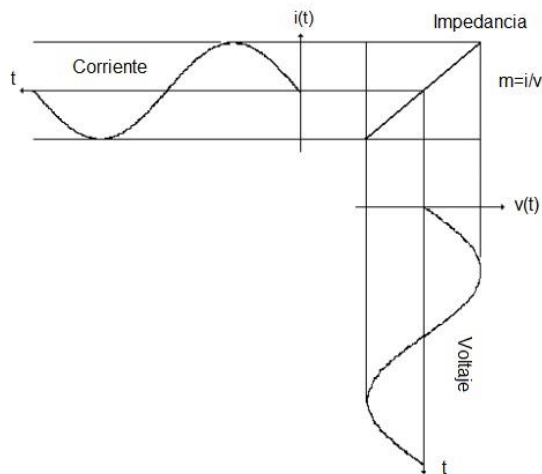


Figura 22. Curva lineal de impedancia.
Fuente: (Téllez, 2000, p.7)

En la Figura 22, observamos que la curva de impedancia es lineal y esto se debe a la proporcionalidad entre el voltaje y la corriente. Cuando esto no ocurre, la curva de impedancia resulta distorsionada debido a que el voltaje no guarda relación con la corriente.

“La curva característica corriente – voltaje de la carga define si es o no lineal su comportamiento y no se debe pensar que todos los equipos que tienen semiconductores por definición son no lineales. (Téllez, 2000, p.7)

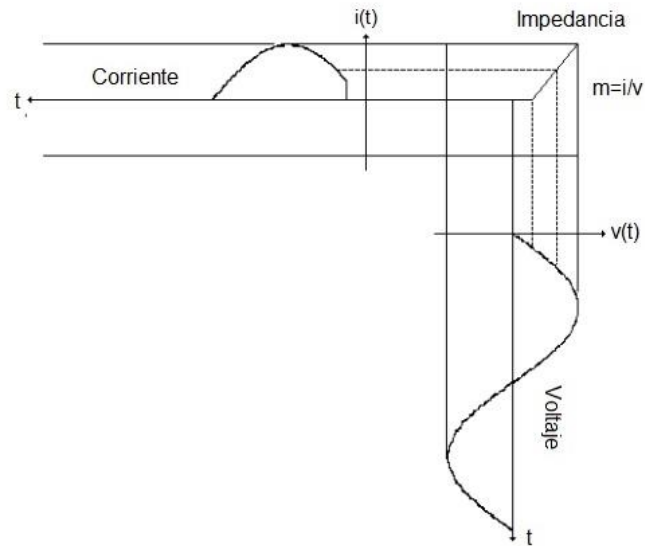


Figura 23. Curva distorsionada de impedancia.
Fuente: (Téllez, 2000, p.7)

De los dos casos, el que es de interés para esta investigación es el de las cargas no lineales pues son las que originan corrientes múltiplos de la componente fundamental de la onda seno, emitiendo pequeños aumentos de corriente en cada ciclo o interrumpiendo la corriente durante un ciclo. Lo que produce que la onda seno de la intensidad sea distorsionada. A estas corrientes se les conoce como corrientes armónicas.

Las cargas no lineales, afectan las redes de electricidad en general y están siendo generadas actualmente por la fabricación de varios dispositivos modernos, los cuales son aplicaciones de la electrónica de potencia. Las corrientes armónicas producidas provocan deformación en la sinusoidal de la intensidad de la fuente y con ello, perturba el buen funcionamiento de los dispositivos generando calor excesivo y pérdidas.

2.1.7 Los armónicos eléctricos

Las señales periódicas bajo ciertas consideraciones, pueden ser representadas por la sumatoria de sus componentes sinusoidales, en otras palabras, una función periódica compleja puede representarse mediante la suma de funciones seno con diferentes amplitudes y frecuencias. Para ser más específicos se trata de una función seno

fundamental y sus múltiplos. A estos múltiplos se les denomina armónicos de la función fundamental. Este teorema lo postulo Fourier.

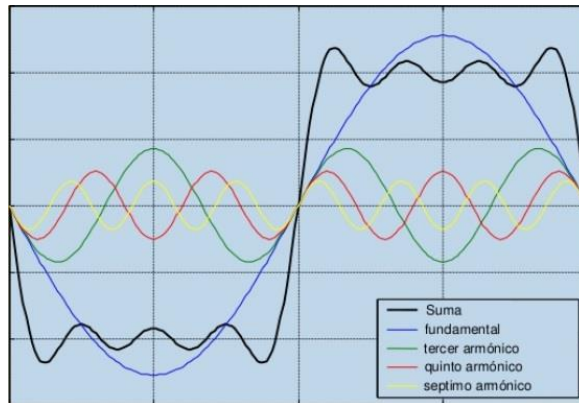


Figura 24. Función y sus componentes armónicas.
Fuente: (Universidad Michoacana, 2003, p.35)

En la Figura 24, si la forma original solo contara con componentes impares, entonces sería simétrica. Pero, si contara con componentes pares e impares la forma sería asimétrica.

2.1.8 La distorsión armónica y sus características

La deformación de una forma seno en el voltaje como en la corriente de un circuito eléctrico se denomina distorsión armónica.

Se puede identificar dos casos que dan el origen a estas perturbaciones en la señal original:

- Los fenómenos transitorios; los cuales pueden ser causados por fenómenos atmosféricos, fallas, conmutación de condensadores, arranques de máquinas rotativas, etc.

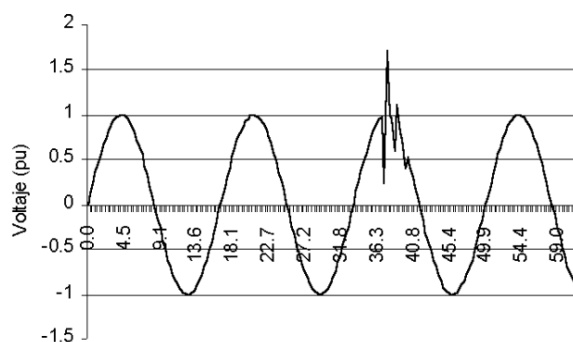


Figura 25. Transitorio en la conmutación de condensadores.
Fuente: (Téllez, 2000, p.3)

Las condiciones permanentes; que están vinculadas a las armónicas que se encuentran en situación estable. Esta distorsión en magnitud baja no va a comprometer el funcionamiento adecuado de los equipos y dispositivos en el circuito.

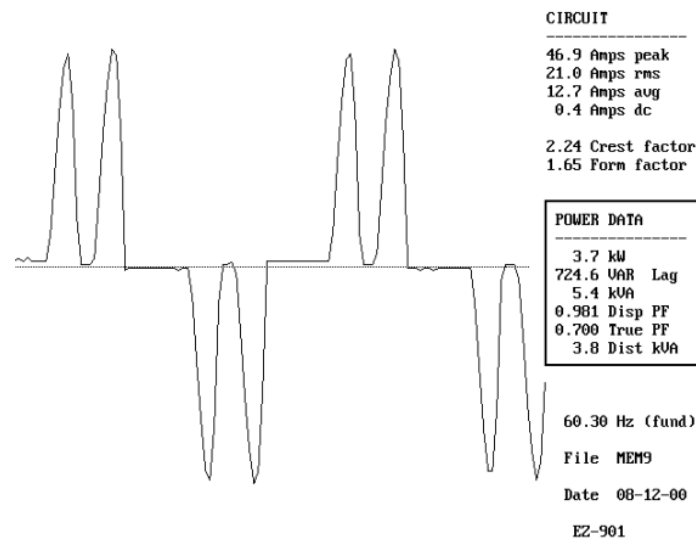


Figura 26. Forma de onda de corriente en variador de velocidad.

Fuente: (Téllez, 2000, p.3)

Las características que presenta la distorsión armónica para ser considerada como tal son las que mencionaremos a continuación:

- La distorsión armónica debe ser permanente y no pasajera.
- Debe ser periódica manteniendo la misma forma en cada ciclo.
- Debe tener valores definidos dentro de cada ciclo, por lo tanto, la energía es finita.

2.1.9 Normas y límites

Tanto el usuario como el proveedor de energía eléctrica tienen la facultad de exigir una limitación en la cantidad de armónicos recibidos y armónicos generados respectivamente. En el Perú, se utilizan la NTCSE “Norma técnica de la calidad de los servicios eléctricos” y la norma IEEE 519-1992 “Prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicas en sistemas eléctricos de potencia”

La NTCSE considera como indicadores de calidad para la presencia de armónicos, en tensiones armónicas individuales y en THD.

Tabla 3
Tolerancia de armónicos según la NTCSE

ORDEN (n) DE LA ARMONICA o THD	TOLERANCIA $ V_i' $ o $ THD' $ (% con respecto a la Tensión Nominal del punto de medición)	
	Alta y Muy Alta Tensión	Media y Baja Tensión
(Armónicas Impares no múltiplos de 3)		
5	2.0	6.0
7	2.0	5.0
11	1.5	3.5
13	1.5	3.0
17	1.0	2.0
19	1.0	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
Mayores de 25	0.1 + 2.5/n	0.2 + 12.5/n
(Armónicas Impares múltiplos de 3)		
3	1.5	5.0
9	1.0	1.5
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
Mayores de 21	0.2	0.2
(Pares)		
2	1.5	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.2	0.5
10	0.2	0.5
12	0.2	0.2
Mayores de 12	0.2	0.2
THD	3	8

Según la NTCSE

Los límites del THD en la tensión según la norma IEEE 519-1992 se pueden apreciar en la Tabla 3. Cabe resaltar que el THD representa la distorsión en función del voltaje nominal y es distinto a la representación convencional de la distorsión.

Tabla 4
Límites de Distorsión Armónica en Voltaje

Límites de Distorsión Armónica en Voltaje en % del voltaje nominal		
Nivel de tensión en la acometida (V_n)	Distorsión armónica individual	Distorsión armónica total THD
$V_n \leq 69kV$	3.0%	5.0%
$69kV < V_n \leq 161kV$	1.5%	2.5%
$V_n > 161kV$	1.0%	1.5%

Según la norma técnica IEEE 519-1992

Los límites del THD en la corriente según la norma IEEE 519-1992 se pueden apreciar en la Tabla 4. Cabe mencionar, que la medición tomada es en la acometida según lo exige la norma. La norma también considera que para los armónicos pares se considera el 25% de lo que dice en tabla y no se permite la presencia de componentes DC correspondientes a la armónica cero. En la tabla 4 podemos apreciar los límites de THD en la corriente.

Tabla 5
Límites de Distorsión Armónica en Corriente

Límites de la distorsión armónica en corriente en la acometida						
I_{CC}/I_L	TDD	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$
$V_n \leq 69kV$						
<20	5.0%	4.0%	2.0%	1.5%	0.6%	0.3%
20-50	8.0%	7.0%	3.5%	2.5%	1.0%	0.5%
50-100	12.0%	10.0%	4.5%	4.0%	1.5%	0.7%
100-1000	15.0%	12.0%	5.5%	5.0%	2.0%	1.0%
>1000	20.0%	15.0%	7.0%	6.0%	2.5%	1.4%
$69kV < V_n \leq 161kV$						
<20*	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
20-50	4.0%	3.5%	1.75%	1.25%	0.5%	0.25%
50-100	6.0%	5.0%	2.25%	2.0%	0.75%	0.35%
100-1000	7.5%	6.0%	2.75%	2.5%	1.0%	0.5%
>1000	10.0%	7.5%	3.5%	3.0%	1.25%	0.7%
$V_n > 161kV$						
<50	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
≥ 50	4.0%	3.5%	1.75%	1.25%	0.5%	0.25%

Según la norma técnica IEEE 519-1992

Las cargas que utilizan convertidores con pulsos $q > 6$ deben ser incrementados a los valores de la tabla por el factor: $\sqrt{q/6}$

Se debe utilizar I_{CC} que cuando se encuentre en operación normal de como resultado mínimo corriente de cortocircuito en la acometida, puesto que al reducir la expresión I_{CC}/I_L el análisis es más severo.

I_L es la demanda máxima de la corriente fundamental en la acometida.

2.1.10 Medición de la distorsión armónica

Existen instrumentos especiales para medir la calidad de la energía. Para ejecutar los algoritmos y proporcionar los datos requeridos se miden los siguientes parámetros:

- Voltaje RMS

$$V_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2}$$

- Corriente RMS

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$

- Cofactor de distorsión (Cd): Relaciona el contenido de armónicos con su valor RMS.

$$C_d = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}}{I_{RMS}} \times 100\%$$

- Distorsión armónica total (THD): Relaciona el contenido armónico con la fundamental.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\%$$

- Distorsión de demanda total (TDD): Relaciona la intensidad armónica y la demanda máxima de la intensidad de carga.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\%$$

h: orden de armónico

I_h: Magnitud de armónico individual

I_L: Máximo promedio de la demanda de corriente (últimos 12 meses)

Según la norma IEEE 519-1992, la medición debe realizarse en la acometida. Se puede aplicar la norma para verificar otros puntos en la instalación considerando límites distintos,

porque puede ocurrir que en un punto se excedan, pero con la interacción de otras cargas se cancelen armónicas y de como resultado un valor aceptable en la acometida.

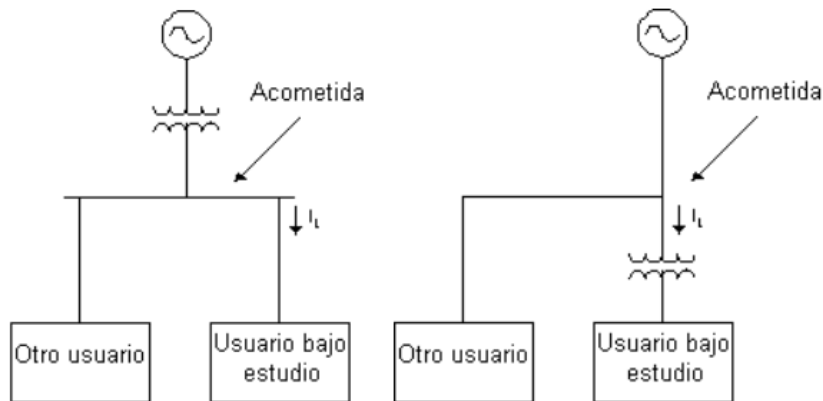


Figura 27. Medición según norma IEEE 519-1992.
Fuente: (Téllez, 2000, p.16)

2.1.11 Indicadores de THD

La representación de la relación de potencias en electricidad se da mediante la siguiente relación:

$$S = P + jQ$$

S: Representa a la potencia aparente

P: Representa a la potencia activa

Q: Representa a la potencia reactiva

Gráficamente se utiliza un triángulo rectángulo que es una representación fasorial, como apreciamos en la Figura 28.

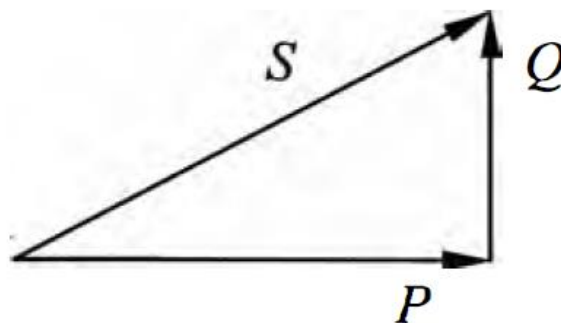


Figura 28. Triángulo de potencias.
Fuente: (Atalaya, 2010, p.13)

Lo más usual es que el factor de potencia se vea afectado principalmente por cargas reactivas inductivas si fuera ese el caso, se tendría que compensar los reactivos con capacitores debidamente calculados y con ingresos en el circuito de forma coordinada. En la Figura 29 observamos gráficamente en el triángulo de potencias como se daría esta compensación.

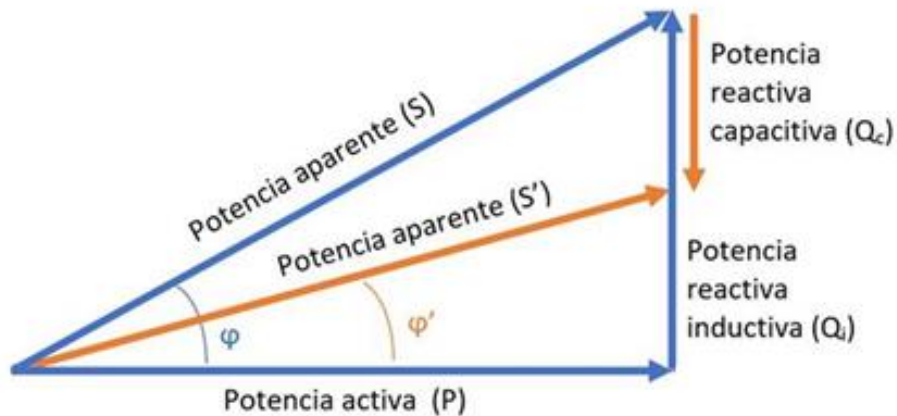


Figura 29. Compensación del factor de potencia.
Fuente: (FULLWAT, 2018)

Cuando el THD en tensión es mínimo, se presenta THD en corriente. Es así que para representar este caso se utiliza la pirámide de potencias. Donde la potencia en presencia de armónicos genera la componente D.

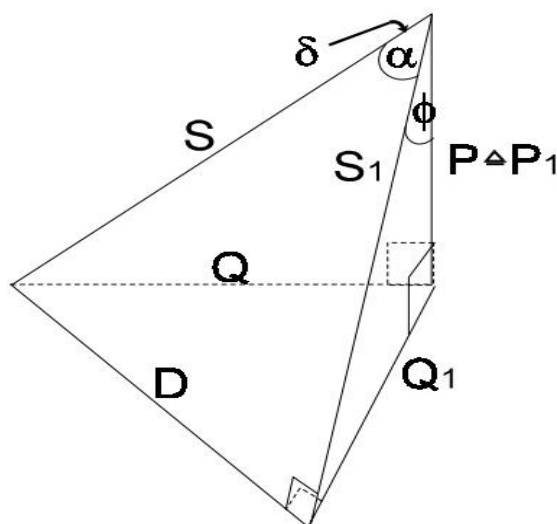


Figura 30. Pirámide de potencias.
Fuente: (Téllez, 2000, p.10)

Cuando la tensión es de forma seno y la intensidad se encuentra deformada se utiliza las siguientes expresiones:

$$\text{Potencia aparente: } S = VI_{RMS} = V\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}$$

$$\text{Potencia eficaz: } P = P_1 = VI_1 \cos\phi_1$$

$$\text{Potencia reactiva: } Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$$\text{Potencia reactiva fundamental: } Q_1 = VI_1 \sin\phi_1$$

$$\text{Potencia distorsionante: } D = V\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}$$

$$\text{Factor de potencia fundamental: } FP_1 = \frac{P}{S_1} = \cos\phi_1$$

$$\text{Factor de potencia: } FP = P/S = \cos\phi$$

2.1.12 La resonancia

En un circuito eléctrico suelen interactuar distintos componentes inductivos y capacitivos donde la tensión y la corriente se encuentran en fase. Existirá entonces resonancia en circuitos en serie, paralelo y una combinación de ambos. Existe una gran dependencia con la frecuencia, es por ese motivo la importancia de la sintonización de circuitos para filtrar frecuencias no deseadas.

La amplificación de una determinada frecuencia debido a la resonancia incrementa el consumo de energía, obligando a los demás componentes a operar en sobrecarga. El resultado de esta exposición durante el trabajo de los componentes por encima de sus parámetros de diseño, ocasiona una situación crítica, la cual puede llegar incluso a su destrucción, es por eso la importancia de su control.

- **La resonancia en paralelo:** Se origina cuando, tanto la reactancia inductiva como la reactancia capacitiva coinciden en magnitud en alguna frecuencia.
- **La resonancia en serie:** Se origina cuando se combinan en serie los bancos de condensadores y la inductancia de los transformadores o las líneas.

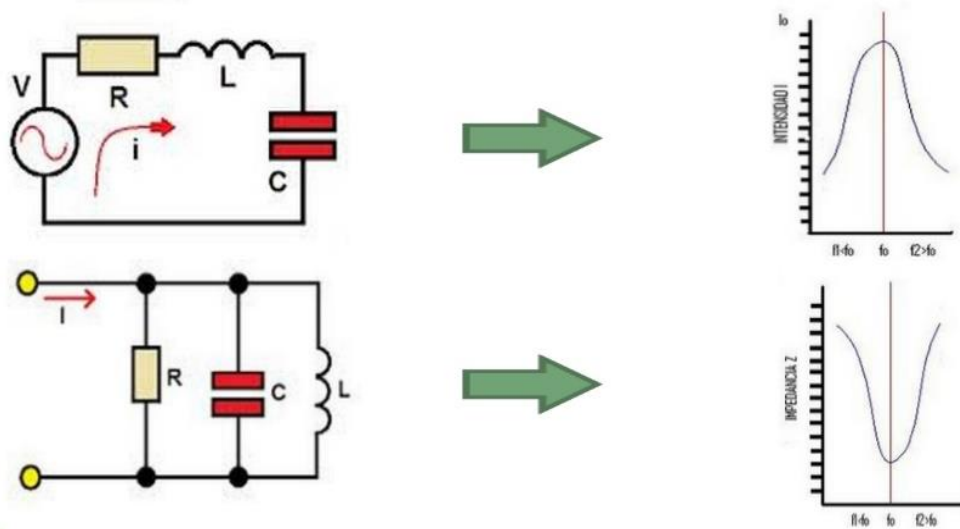


Figura 31. Resonancia en serie y paralelo.
Fuente: (Téllez, 2000, p.12).

2.2 Problemas similares y análisis de soluciones

2.2.1 Efecto en los sistemas de potencia

La calidad en la energía eléctrica se ve mermada por los armónicos y son habitualmente los causantes, pero no son los únicos en intervenir. Principalmente los efectos de los armónicos en los sistemas de potencia son:

- Inadecuado funcionamiento del sistema eléctrico o de algún componente.
- Debilitamiento de los dieléctricos en los componentes de forma prematura.
- La amplificación de armónicos por resonancia en serie o paralelo.
- La disminución del rendimiento en los componentes del sistema eléctrico de potencia.

En la Figura 32 podemos apreciar como los armónicos son solo un componente de las causas totales que generan efectos negativos en los sistemas de potencia.

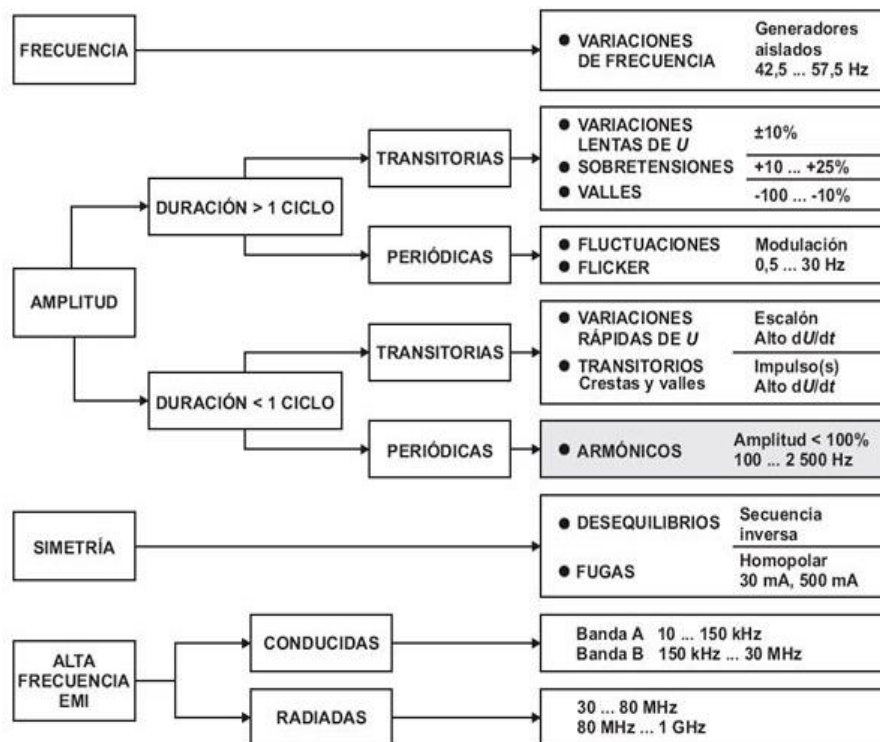


Figura 32. Problemas principales de una red eléctrica.
Fuente: (CIRCUITOR, 2018)

2.2.2 Efecto en los transformadores de potencia de M.T.

En el diseño de los transformadores se considera que su operación se da a una temperatura no muy por encima de la ambiental. Para ello, la frecuencia y la potencia nominal en los cálculos son importantes para que el transformador sea capaz de disipar las pérdidas en forma de calor y así evitar una disminución en su vida útil.

En operación, los transformadores de potencia experimentan esfuerzos mecánicos, eléctricos y térmicos que debilitan los dieléctricos. El oxígeno, la humedad y la temperatura alta en interacción con los esfuerzos eléctricos apremian la degradación de los dieléctricos. En segundo plano están los esfuerzos mecánicos por vibración del núcleo, los cortocircuitos, lodos y ácidos generados por la descomposición del aceite dieléctrico.

En la siguiente tabla observamos los tipos de falla y su frecuencia de ocurrencia.

Tabla 6*Fallas de transformadores de potencia de la CFE en 1999.*

Tipos	Frecuencia
Problemas aislamiento en las bobinas	49%
Aisladores	26%
Conmutador de derivaciones	10%
Exposiciones por incendio	3%
Núcleo	2%
Otros	10%

Fuente: (CFE, 1999)

En el capítulo anterior se mencionó las pérdidas que se producen en los transformadores, tanto en los devanados (I^2R), como en el núcleo (corrientes parasitas). A continuación, explicaremos el efecto de los armónicos en las pérdidas ya mencionadas.

- **En los devanados:** Si la carga posee armónicas, debe tenerse en cuenta que se dará un incremento de estas pérdidas por el efecto skin.
- **En el núcleo sin carga:** La forma de onda del flujo que pasa por el núcleo está relacionado directamente con la forma de onda de la tensión de excitación. Puede ocurrir que la corriente de magnetización contenga armónicos, pero al ser muy pequeños en relación a la corriente de carga, sus efectos son mínimos y por lo tanto no son considerados.
- **En el núcleo por corrientes parasitas:** Se produce un incremento de perdidas en las bobinas que conducen las corrientes de carga con forma de onda distorsionada. Esto produce un calentamiento considerable.
- **En la estructura:** Este tipo de perdidas generan calor en la estructura y pueden contribuir en el aumento de temperatura de las bobinas.



*Figura 33. Efecto piel o efecto piel.
Fuente: (ISSUU, 2017)*

2.2.3 Efecto en los bancos de capacitores

La sumatoria de tres factores intervienen en la afectación de los capacitores. La magnitud de la corriente y la temperatura se incrementan con el estrés sufrido por el aumento del valor RMS de la tensión. El dieléctrico se reduce y pone en riesgo el dispositivo comprometiendo el punto de falla. El estándar IEEE 18-2002 para condensadores de potencia, menciona los límites de operación para bancos de condensadores.

En la siguiente expresión observamos la relación existente entre el voltaje y la potencia reactiva en la salida.

$$VAR = \frac{V^2}{X_c}$$

Un incremento en el voltaje de entrada desencadena un aumento considerable en la potencia reactiva. Basta una carga ligera en contraste a la del sistema o la operación de alguna protección originando el desbalance del sistema y la distorsión armónica que normalmente genera problemas con los relés.

Si se produce una resonancia en paralelo, la intensidad aumenta por las elevadas tensiones que origina, produciendo un compromiso en los aislamientos de los cables, bobinas y dieléctricos.

Si se produce una resonancia en serie se reduce a la parte resistiva el cual depende de la intensidad que origina la resonancia.

2.2.4 Efecto en los cables

A diferencia de las líneas áreas cuyos dieléctricos son principalmente el aire y los arreglos de aisladores sujetos en las torres. Los cables que transportan energía eléctrica tienen una configuración de materiales que proporcionan el aislamiento adecuado para poder ser instalados en ductos subterráneos o directamente enterrados. Los cables son fabricados según la cantidad de conductores que sean necesarios. Generalmente los encontramos unipolares y tripolares, pudiendo ser de más conductores.



*Figura 34. Cable unipolar.
Fuente: (CENTELSA, 2018, p.106)*



*Figura 35. Cable tripolar.
Fuente: (CENTELSA, 2018, p.114)*

Las características del cable varían según la tensión que va a transportar. En baja tensión generalmente es solo aislamiento y protección, pero cuando se trata de media y alta tensión los componentes que conforman el cable, aumentan y se tiene mayor cuidado en su elaboración e instalación. En la figura 36 observamos un cable cuya tensión nominal es 35kV.



*Figura 36. Partes de un cable de M.T.
Fuente: (CENTELSA, 2018, p.98)*

Donde:

1. Conductor de cobre suave (o aluminio) cableado.
2. Semiconductor
3. Aislamiento
4. Semiconductor
5. Pantalla y cinta de Cu
6. Chaqueta

Cuando sobre un conductor fluye corriente directa su distribución es en la totalidad de la sección transversal. Cuando sobre el mismo conductor fluye corriente alterna la distribución de corriente se da principalmente en el exterior del conductor y está íntimamente relacionada con la frecuencia. A mayor frecuencia la corriente se aleja más del centro del conductor. Este fenómeno se revisó anteriormente y se denomina efecto piel o skin.

Entonces, existe una relación entre $X_S=R_{ac}/R_{dc}$ y la frecuencia según el calibre de los conductores.

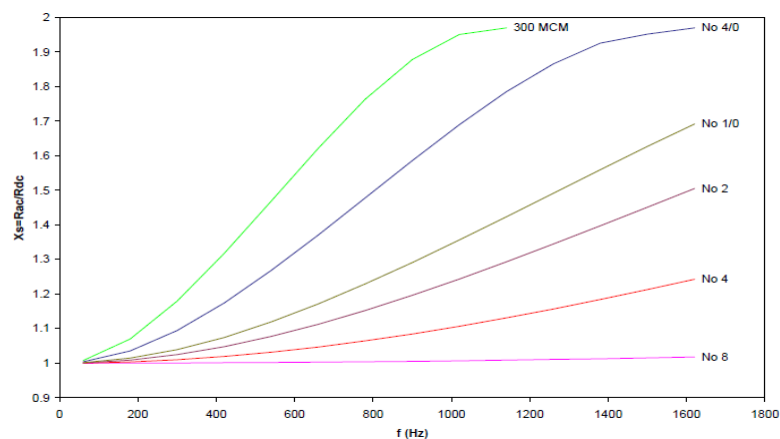


Figura 37. Relación X_S vs frecuencia.

Fuente: (Iñaki, 2015, p.2)

En la Figura 37 tenemos la relación $X_S=R_{ac}/R_{dc}$ con la frecuencia y observamos que cuando la frecuencia crece la relación X_S aumenta. Esto se acentúa con conductores de mayor calibre.

Como ejemplo de aplicación de este comportamiento adverso al fin conductivo de los cables, es el hilo de Litz, que consiste en un conductor formado por muchos conductores de menor área y aislados entre sí, solo unidos en los extremos. De esta manera se logra revertir este comportamiento y se aumenta considerablemente el área efectiva de conducción.

Otro ejemplo de aplicación en los cables que busca disminuir la pérdida capacitiva es el diseño de conductores huecos, los cuales aprovechan los bordes como conductores efectivos y el espacio en el centro está provisto de un alma de acero para proporcionar soporte mecánico al conductor.

2.2.5 Efecto en los conductores neutros

Normalmente en un sistema trifásico balanceado, en estrella y con cargas lineales la fundamental de 60Hz de la intensidad que viaja por cada fase se hace nula al llegar al neutro. Esto se explica por qué las intensidades tienen un ángulo de desfase de 120 grados y en sumatoria fasorial resulta cero. En el caso de cargas monofásicas no lineales, los armónicos de tercer orden y sus múltiplos impares se suman en el neutro. Estos armónicos son conocidos como “triplens”. En la Figura 38 apreciamos en color azul los armónicos de 3er orden en cada una de las fases y como al encontrarse en fase se suman en el neutro.

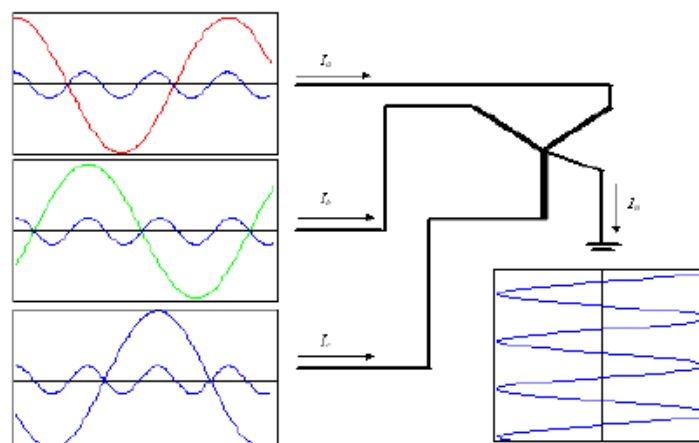


Figura 38. Armónicos de 3er orden en el neutro.

Fuente: (Iñaki, 2015, p.3)

Puede darse el caso que ante muchas cargas monofásicas no lineales la corriente en el neutro supere incluso a la corriente de las fases. Al ocurrir esto el neutro se sobrecalienta y también genera una diferencia considerable de voltaje entre el conductor neutro y tierra.

2.2.6 Efecto en los motores

Al igual que en los transformadores la tensión que se aplica a los motores, induce un campo magnético en su núcleo. Este campo produce pérdidas magnéticas denominadas pérdidas por el ciclo de Histéresis el cual ya revisamos en el primer capítulo. Las pérdidas por histéresis son proporcionales a la frecuencia y las pérdidas por corrientes de Eddy son proporcionales al cuadrado de la frecuencia. Los armónicos de tensión con una frecuencia superior a la fundamental producen otras pérdidas en el núcleo de los motores aumentando la temperatura del núcleo y los arrollamientos.

Tabla 7
Efectos de los armónicos.

Componente / Elemento	Problema	Efecto
Transformadores	Circulación de intensidades armónicas por las bobinas	Sobrecalentamiento de las bobinas Pérdida de aislamiento térmico por calentamiento. Pérdidas en el Cu y en el núcleo. Menor rendimiento. Sobredimensionamiento del transformador. Saturación del núcleo.
Condensadores	Resonancia paralela con el sistema. Amplificación de los armónicos	Calentamiento Envejecimiento prematuro de condensadores Destrucción de condensadores.
Conductor	Aumento de la intensidad Aumento de la resistencia Aumento de las pérdidas térmicas. Efecto piel	Calentamiento de los cables. Disparo de protecciones
Conductores neutros	Circulación de armónicos múltiplos de 3 Retorno por el conductor neutro	Sobreintensidad de la corriente circulando por el neutro. Calentamiento en el neutro Degradación prematura del conductor neutro Tensión neutro-tierra Disparo de protecciones.
Motores	Circulación de corrientes armónicas por los devanados.	Sobrecalentamiento de los devanados Pérdida de aislamiento térmico por calentamiento. Pérdidas en el cobre y en el hierro. Disminución del rendimiento Vibraciones en el eje, desgaste mecánico en rodamiento y excentricidad Reducción del par.

Fuente: (Schneider Electric, 1998)

2.3 Técnicas de sustento

2.3.1 Técnica en los transformadores

En los transformadores, los armónicos incrementan de forma importante la temperatura y las pérdidas. Con el incremento de las corrientes armónicas el diseño convencional de los transformadores cambia para compensar el aumento de temperatura ocasionado. El factor establecido por la Underwriter Laboratories para establecer la capacidad de un transformador expuesto a cargas no lineales sin incrementar su temperatura normal se denomina, factor K. Este factor cuantifica el sobrecalentamiento del transformador expuesto a armónicos.

La desclasificación de un transformador es un estudio que se le realiza para evaluar su comportamiento frente a los armónicos y determinar la disminución de su capacidad de carga en presencia de los mismos. Por ello, un transformador diseñado para una determinada capacidad de carga, ante la presencia de armónicos, puede desclasificarse para su carga nominal y asignarse una carga menor, de esta manera se busca no afectar su comportamiento y vida útil.

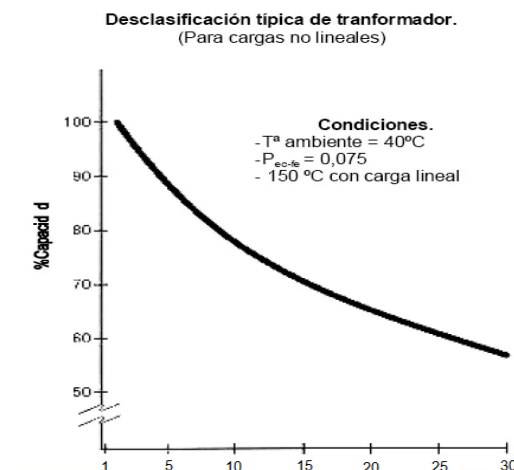


Figura 39. Desclasificación de la capacidad de carga en función del factor k.

Fuente: (ISEESAC, 2019)

En la Figura 39 observamos una grafica que nos indica como la capacidad de un transformador disminuye sin incrementar su temperatura normal en relación al incremento del factor K. Esto quiere decir que al incrementar el factor K debido a la interacción con

armónicos, la temperatura del transformador debería incrementarse. Pero si quisiéramos mantener la temperatura normal del transformador, va a ser necesario disminuir su capacidad de carga. En otras palabras, el transformador para no elevar su temperatura frente a la presencia de armónicos debería trabajar con menor capacidad de carga para el cual fue diseñado.

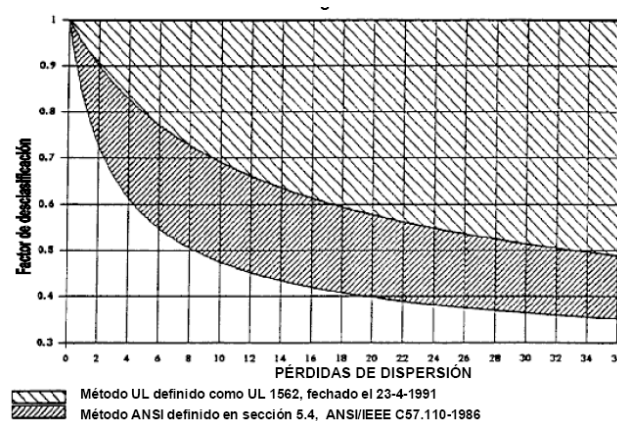


Figura 40. Factor de desclasificación de transformadores para carga tipo K13.

Fuente: (ISEESAC, 2019)

En la Figura 40 observamos como las pérdidas de dispersión hacen variar el factor de desclasificación en un transformador Tipo K13. En una comparación entre la norma ANSI y la UL, notamos como la primera es más conservadora. Cuanto mas aumentan las perdidas por dispersión, disminuye la capacidad de carga del transformador y por ende el factor de desclasificación varia.

2.3.2 Técnica en los bancos de capacitores

Dentro de los sistemas de potencia industriales con armónicos, los condensadores son instalados para cumplir con las condiciones requeridas en el factor de potencia. Pero los bancos de condensadores suelen convertirse en una fuente resonante paralela al interactuar con la inductancia del sistema. Para mitigar el problema, los bancos son sintonizados convenientemente para rechazar algunos armónicos agregando reactancia.

La mejor técnica para evitar la resonancia se realiza instalando bancos de capacitores grandes en el bus principal. Con ello obtenemos:

- Mayor potencia reactiva en el sistema.
- Mayor control de voltaje e intensidad armónica.

También se agregan reactores para modificar la frecuencia resonante de la frecuencia armónica principal. Para hallar la frecuencia de resonancia del bus del capacitor se utiliza:

$$f_r = f_s \sqrt{\frac{kVA_{SC}}{kVA_C}}$$

Siendo f_r la frecuencia de resonancia, f_s la frecuencia del sistema, kVA_{SC} nivel de falla trifásica en el sistema, kVA_C potencia del banco de condensadores.

2.3.3 Técnica en los cables

Normalmente existe peligro de resonancia al interactuar las partes inductivas con los cables que resultan ser capacitivos por excelencia. Los armónicos y la resonancia producen efectos negativos en los cables.

Incremento de la temperatura debido a una intensidad RMS mayor a la habitual, efecto skin, y efecto de proximidad. Ambos efectos son proporcionales al cuadrado de la frecuencia. Por ello, es conveniente aminorar su longitud de existir un THD mayor al 10%.

Un caso especial es el cable alimentador de un variador de frecuencia (VFD) cuyo dimensionamiento debe considerar el calentamiento de la intensidad RMS total y el efecto skin de los armónicos de orden superior. El efecto skin depende del tamaño, por ello, no se deben utilizar tamaños grandes en los conductores.

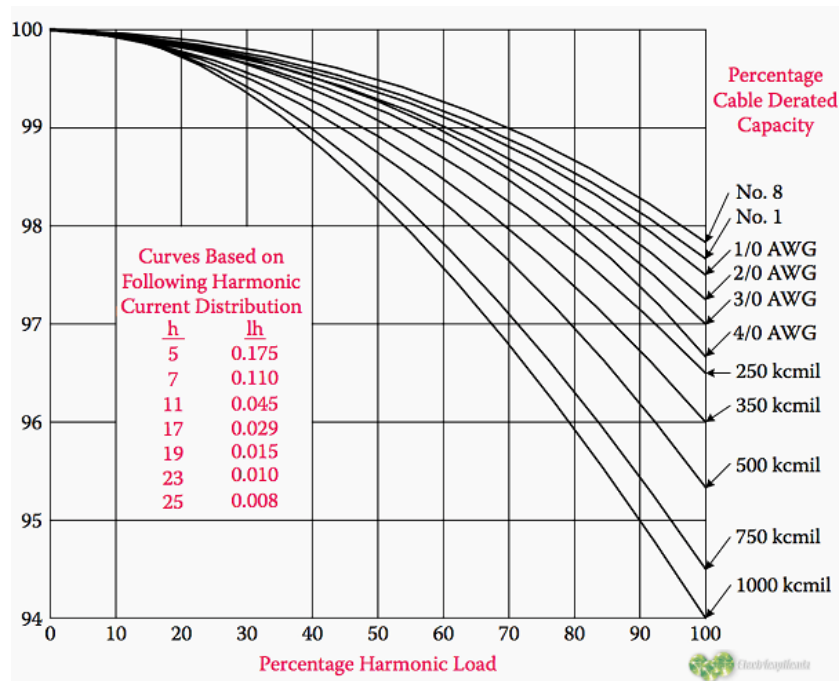


Figura 41. Factores de reducción vs % de intensidad armónica.
Fuente: (Electriaplicada, 2017)

En la Figura 41, se observa los factores de reducción del conductor vs. Porcentaje de intensidad armónica con armónicos producidos por un variador de 6 pulsos.

Se recomienda usar cables tripolares y no monopolares, evitar cables grandes no excediendo de 350 kcmil, utilizar cables blindados para voltajes superiores a 600V.

2.3.4 Técnica en los conductores neutros

En los conductores neutros se concentran las corrientes armónicas de tercer orden denominadas triplens provocando una fuga de energía que no solo afecta en pérdidas de consumo si no en calor.

Una manera de evitar esto es sobredimensionando el conductor neutro considerando una sección que pueda soportar la presencia de los armónicos que puedan presentarse, para ello se considera 1.7 veces más la sección del conductor con respecto a la de las fases. Otra manera de evitar estos armónicos aguas arriba, es empleando transformadores de aislamiento con grupo de conexión Dy.

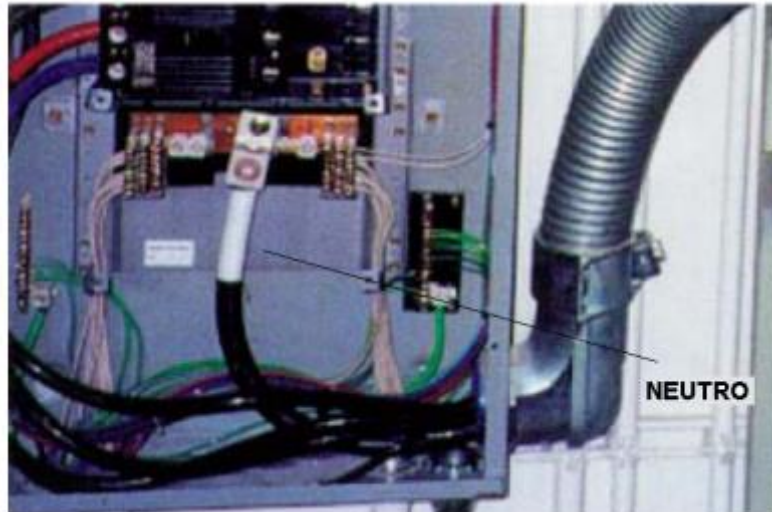


Figura 42. Neutro sobredimensionado en su doble.

Fuente: (Iñaki, 2015, p.2)

2.3.5 Técnica en los motores y generadores

Típicamente los efectos como el calentamiento en el cobre y el hierro, el aumento de ruido y las corrientes armónicas en el rotor son los efectos en estos equipos.

Como ya habíamos visto en el capítulo anterior los armónicos de orden 5 y 7 en el estator producen armónicos de orden 6 en el rotor, igualmente los armónicos de orden 11 y 13 en el estator producirán armónicos de orden 12 en el rotor.

El desequilibrio del sistema también influye en la aparición de armónicos, incluso los propios generadores producen armónicos del tipo triplens. La utilización de transformadores con conexión Delta puede solucionar este problema. Otra solución es usar circuitos distintos para alimentar componentes que produzcan armónicos (Figura 43).

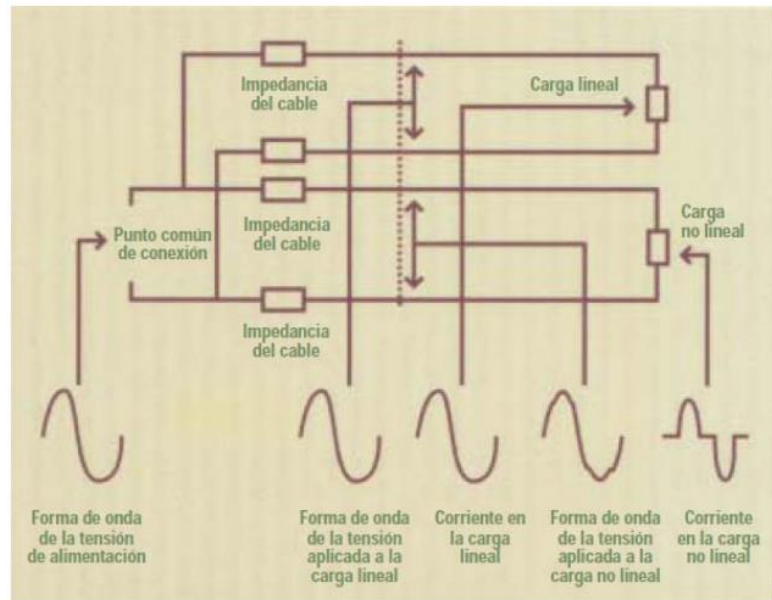


Figura 43. Generación de un circuito limpio a partir de uno deformado.
Fuente: (AESOLUCIONES, 2018)

CAPITULO 3

PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN

3.1 Análisis de los armónicos

El estudio del THD determina la magnitud de la intensidad de fuente de electricidad y los voltajes en las barras para cada una de las frecuencias armónicas y otros parámetros como: Las impedancias equivalentes en las barras y el THD. Con ellos se puede analizar la existencia de frecuencias de resonancia y ensayar la mitigación de los armónicos hallados.

3.1.1 Modelos de los componentes para el flujo de armónicos

Se utilizará el estándar IEEE 399-1997 “Practicas recomendadas para el análisis sistemas de energía eléctrica comerciales e industriales”

El sistema eléctrico se constituye por líneas, transformadores, generadores, reactores, capacitores, cargas lineales y cargas no lineales. Para todos ellos se hace un modelamiento según sus características para su frecuencia fundamental y cada frecuencia armónica. Entonces, los parámetros utilizados para el flujo de carga y cortocircuito se pueden utilizar para analizar el flujo de armónicos. Es necesario tener en consideración algunos datos adicionales para adicionar la condicional de la frecuencia. En los modelos

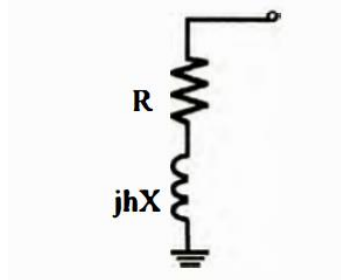
equivalentes y parámetros donde se asumen contantes de forma ilustrativa, es posible incorporar nuevos modelos y asumir otras constantes.

A continuación, presentaremos los modelos correspondientes a las máquinas síncronas, los transformadores, máquinas de inducción, cargas estáticas, motores, líneas y cables.

Modelo de un generador: Estas máquinas síncronas con diseño moderno no producen armónicos considerables y se les puede representar por una impedancia conectada a tierra. Usualmente se utiliza cualquier reactancia entre la reactancia de secuencia negativa o subtransitoria. Se puede utilizar un circuito RL con una reactancia subtransitoria X/R con valores entre 15 y 50 en la fundamental. Debido al efecto piel la resistencia del generador se corrige para altas frecuencias.

$$R = R_{dc}(1 + Ah^B)$$

$$X = X'' \quad \text{o} \quad X_2 = \frac{X''_d + X''_q}{2}$$



*Figura 44. Modelo equivalente de maquina síncrona.
Fuente: (Atalaya, 2010, p.23)*

Modelo de un transformador: Estas máquinas estáticas se modelan de forma ideal en serie con una impedancia de fuga. Se hace variar linealmente la reactancia de fuga con la frecuencia y se debe considerar el efecto piel en el modelo de la resistencia. El CIGRE recomienda variantes para la impedancia de fuga.

$$R_T = R_{dc}(1 + Ah^B)$$

R_T y X_T son valores nominales de R y X del transformador.

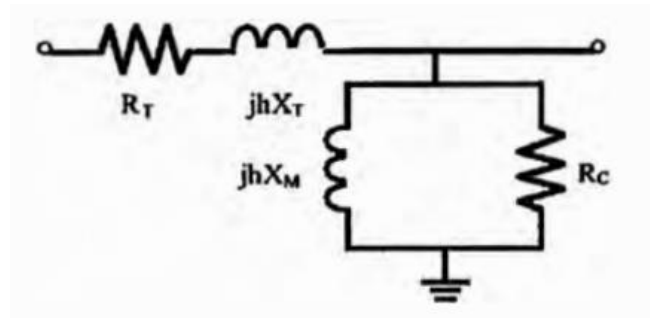


Figura 45. Modelo equivalente de transformador.
Fuente: (Atalaya, 2010, p.23)

Modelo de un motor de inducción: Estas máquinas rotativas tienen un modelo que trata de una impedancia en el estator, un circuito magnético con la reluctancia y una impedancia dependiente del resbalamiento en el rotor. Debido al efecto piel y el resbalamiento en frecuencias diferentes a la fundamental se debe tener ciertas consideraciones.

El resbalamiento armónico mayor al noveno orden puede considerarse 1 y la inductancia del motor puede aproximarse al valor del rotor bloqueado.

La razón de la corriente de motor bloqueado con la corriente nominal se puede considerar 6 y el resbalamiento nominal se considera 1% en los motores.

Se considera que los motores están en régimen permanente, en otras palabras, que el resbalamiento mantiene su valor nominal.

$$R = \frac{V^2}{P} \quad X = \frac{V^2}{Q}$$

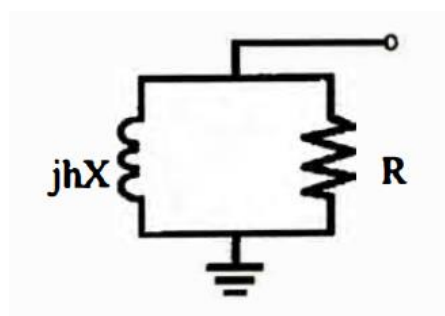


Figura 46. Modelo equivalente de un motor.
Fuente: (Atalaya, 2010, p.23)

Modelo de carga: Los modelos para cargas se pueden dividir en 2 tipos: Modelo para carga individual considerándolas pasivas, de estado sólido, rotativas, etc. y modelo para carga agregada representada en un circuito mixto serie paralelo. Estos modelos se pueden utilizar para carga de motor o cargas pasivas.

Modelo de líneas y cables: Si se trata de una línea corta el circuito RL en serie debe considerar el efecto piel para frecuencias altas. En el caso de líneas largas se utiliza el modelo con condensadores shunt. El modelo más usado para representar la respuesta de la línea en varias frecuencias es el de parámetros distribuidos.

$$M = 0.001585 \sqrt{\frac{f}{R_{dc}}}$$

f : frecuencia (Hz)

R_{dc} : resistencia dc ($\frac{ohm}{m}$)

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}}; \gamma_e = \sqrt{zy}$$

l : longitud(m)

$$R = R_{dc} + (0.035M^2 + 0.938), M < 2.4$$

$$R = R_{dc} + (0.035M^2 + 0.3), M > 2.4$$

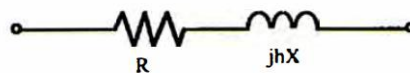
$$Z = Z_c \sinh(\gamma_e l)$$

$$\frac{y}{2} = \frac{1}{Z_c} \tanh\left(\frac{\gamma_e l}{2}\right)$$

$$z = r + jX_L \left(\frac{ohm}{m}\right)$$

$$y = g + jb_c \left(\frac{ohm}{m}\right)$$

Línea corta



Línea larga

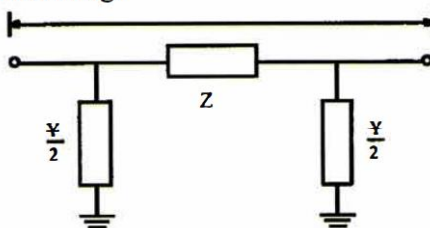


Figura 47. Modelo equivalente de líneas y cables.

Fuente: (Atalaya, 2010, p.24)

3.1.2 Fuentes de armónicos

Las fuentes intensidad entregan corriente en el sistema y las fuentes de voltaje generan voltaje en la barra de la red. Las fuentes que generan armónicos interactúan para producir lo siguiente:

- Características en los dispositivos de voltaje por intensidad no lineal.
- El rizado de alta frecuencia en la transmisión de control.

Las fuentes más características son los convertidores y los hornos de arco.

Un variador de 6 pulsos está constituido por 6 partes rectificadoras. El variador de 12 pulsos está formado por 2 variadores de 6 pulsos conectados por un transformador de desplazamiento de fase.

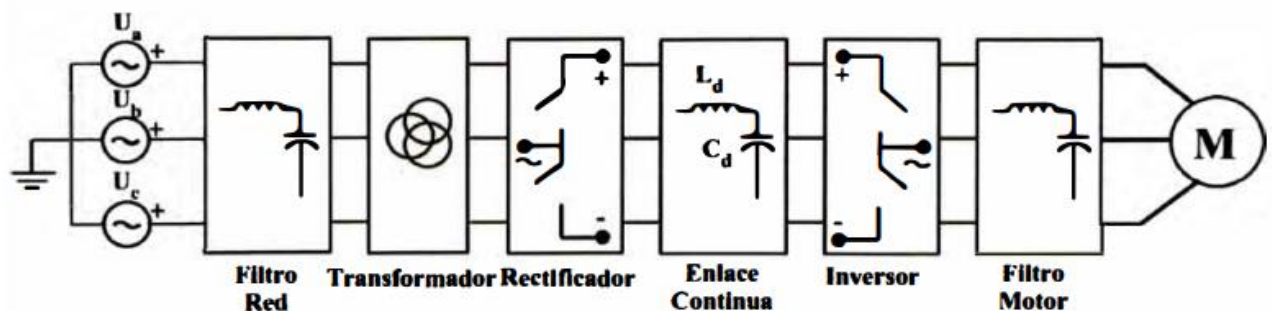


Figura 48. Diagrama de bloques de un variador.

Fuente: (Atalaya, 2010, p.29)

Tabla 8.
Características de los convertidores.

Armónicos Nº1	Numero de pulsos de rectificador				Frecuencia armónica	Corriente armónica en porcentaje de la fundamental	
	6	12	18	24		Teórico	Práctico
5	X				300	20.00	19.20
7	X				420	14.20	13.20
11	X	X			660	9.09	7.30
13	X	X			780	7.69	5.70
17	X		X		1020	5.88	3.50
19	X		X		1140	5.26	2.70
23	X	X		X	1380	4.36	2.00
25	X	X		X	1500	4.00	1.60
29	X				1740	3.45	1.40
31	X				1960	3.23	1.20
35	X		X		2100	2.86	1.10
37	X		X		2220	2.70	1.00

Fuente: (Atalaya, 2010, p.30)

En la Tabla 8 observamos la generación de corriente armónica en porcentaje de la fundamental a partir de la relación del número de pulsos de los convertidores y los armónicos que generan. Por ejemplo, en un convertidor de 6 pulsos que genera un armónico de orden 7 con una frecuencia armónica de 420Hz produce una corriente armónica teorica de 14.2% de la corriente fundamental. En la practica es solo el 13.2% de la corriente fundamental.

3.1.3 Atenuación de los armónicos en los transformadores de potencia

Entre las técnicas que se utilizan para superara la dificultad de los armónicos, se utilizan métodos numéricos que utilizan el principio del método de Newton Raphson para hacer un flujo de cargas y hallar incógnitas.

Penetración armónica: Se hace dos suposiciones: El modelo de carga depende del voltaje con onda principal y la potencia lineal está íntimamente relacionada con la frecuencia.

Este método es bien simple, pero no considera la interacción armónica.

Penetración armónica iterativa: Básicamente es igual que el método anterior, solo que posee una interacción armónica utilizando un subproceso iterativo. Este método se puede complementar con otras iteraciones de flujo de carga con frecuencia principal.

Flujo de carga completo: Este método necesita un modelo analítico de cargas armónicas que se puedan ingresar a la Jacobiana.

3.2 Factor K

Las cargas no lineales que son alimentados por un transformador van a ocasionar que este genere mayor temperatura en su parte activa llegando al sobrecalentamiento y sobrepasando su potencia nominal.

Los transformadores elevan su temperatura por la presencia de cargas no lineales y como estas generan armónicos que son directamente proporcionales al cuadrado de la corriente armónica multiplicado por las pérdidas que se generan, es así que mediante un numero pueden relacionar el aumento de la temperatura debido a cargas no lineales sobre el transformador. Ese número es el factor K.

En las especificaciones de un transformador se puede observar este factor K si en caso el transformador hubiera sido diseñado para mitigar los efectos de armónicos.

$$Factor\ K = \sum_{h=1}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_{RMS}} \right)^2 h^2$$

En la expresión I_h representa la corriente de carga no lineal que está conectada al transformador.

La UL (Underwriter laboratories) cataloga los valores de K para transformadores como describe la Tabla 9.

Tabla 9*Tabla de valores de factor K comerciales*

Factor K para transformadores comerciales
K-4
K-9
K-13
K-20
K-30
K-40

Fuente: (Lázaro, 2013)

La determinación del factor K de la carga real a alimentar es muy importante antes de determinar el tipo de transformador a utilizar. Cuanto mayor es el valor K en un transformador este estará preparado para lidiar con mayor cantidad de armónicos. Si bien se podría utilizar los tipos K20 o incluso K30 para oficinas tendría que justificarse con el estudio previo. Los valores de factor K más utilizados en transformadores son el 4 y 13, por que sirven para mitigar los armónicos generados por los rectificadores.

Un transformador que posee un factor K elevado o sobredimensionado al necesario, beneficia únicamente al que lo vende y no al usuario.

3.3 Materiales utilizados

La selección de los materiales que van a intervenir en la fabricación de los transformadores toma mucha importancia. Por un lado, se tienen que cumplir con las normas exigidas y por otro no se debe exceder en los costos. La verificación del comportamiento de los materiales en las pruebas eléctricas en fabrica y en mantenimiento de rutina vana describir el tiempo estimado de vida útil del transformador.

Una consideración que se toma en cuenta en los cables esmaltados es que en el aluminio presenta más fallas por metro a comparación del cobre, lo que supone una mayor probabilidad de fallas por descargas atmosféricas.

Tabla 10*Tabla de propiedades del aluminio y el cobre.*

Propiedades	Unidad	Aluminio	Cobre
Conductividad térmica	W/m °C	210	398
Coeficiente de expansión	°C ⁻¹	23.86x10 ⁻⁶	16.7x10 ⁻⁶
Calor específico	J/kg °C	904	384.6
Módulo de elasticidad	kgf/mm ²	7.03	12.03
Densidad de masa	kg/dm ³	2.7	8.89
Límite de fluencia $\sigma=0.2\%$	kgf/mm ²	1.3	7
Resistividad a 75°C	Ωm	3.47x10 ⁻⁸	2.09x10 ⁻⁸
Tensión de ruptura a 20 °C	kgf/mm ²	4.9	23

Fuente: (Lázaro, 2013)

Las características eléctricas de estos materiales hacen suponer que el cobre es el material más adecuado por su baja resistividad y alta resistencia de ruptura. En la actualidad, hay una tendencia a reducir los costos de fabricación y el aluminio correctamente dimensionado puede llegar a tener un alto grado de confiabilidad para la construcción de transformadores, tanto así que las mejores marcas del mundo están utilizando aluminio por su bajo costo frente al cobre.

3.4 Pruebas de contraste en un transformador

De las pruebas realizadas por la UCSA a un transformador expuesto a cargas lineales y luego a cargas no lineales podemos observar los efectos que se producen por los armónicos.

Para las pruebas se utilizó un transformador con las siguientes características:

Tabla 11
Características del transformador

CARACTERISTICAS DEL TRANSFORMADOR		
Potencia	1.2	kVA
Tensión nominal en el primario	220	V
Tensión nominal en el secundario	220	V
Corriente nominal	4.59	A
Área del conductor	0.512	mm ²
Frecuencia	50	Hz
Material del conductor	Cobre	

Fuente: (Lázaro, 2013)

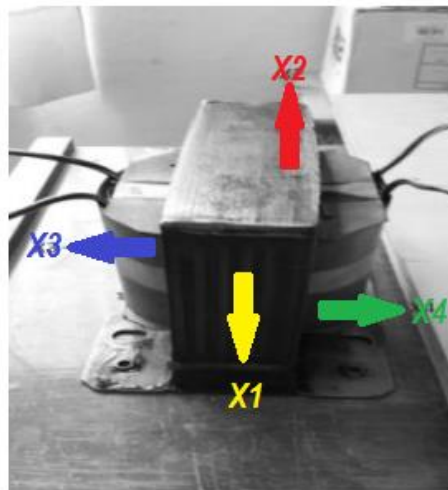


Figura 49. Transformador de prueba.
Fuente: (UCSA, 2014)

Donde:

- X1: Lado lateral del núcleo
- X2: Lado superior central del núcleo
- X3: Bobina primaria
- X4: Bobina secundaria

Prueba con carga lineal netamente resistiva.

La fuente de alimentación tenía una onda sinusoidal casi puro con solo un 0.08% de THD, la temperatura ambiente 27°C y la carga es de 500W netamente resistivo.

La prueba tuvo una duración de 4 horas.

Tabla 12
Resultado de la prueba con carga lineal

CARGA LINEAL					
Tiempo	Temperatura				Promedio
	X1	X2	X3	X4	
T0	20.3°C	20.1°C	20.3°C	20.5°C	20.3°C
T1	45.1°C	43.9°C	48.5°C	53.8°C	48.1°C
T2	61°C	58.6°C	58.6°C	68.3°C	61.6°C
T3	66.6°C	64.2°C	60.8°C	70.8°C	65.6°C
T4	70.3°C	67.6°C	67.1°C	72.6°C	69.4°C

Fuente: (UCSA, 2014)

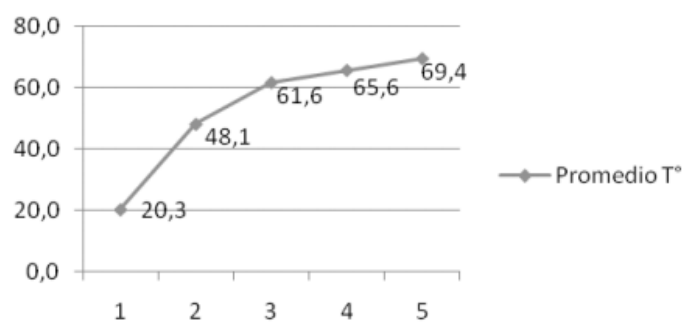


Figura 50. Promedio de temperatura con carga lineal.

Fuente: (UCSA, 2014)

El incremento de la temperatura observado desde el inicio de la prueba fue de 49.1°C

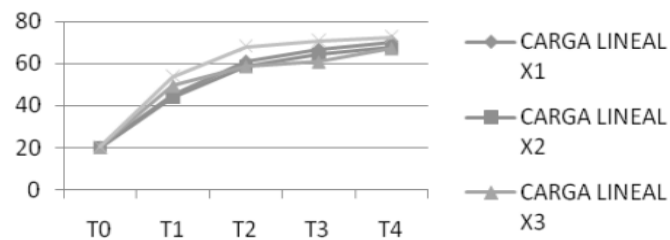


Figura 51. Temperatura del transformador por zonas 1.

Fuente: (UCSA, 2014)

Prueba con carga no lineal.

La fuente de alimentación tenía 40% de cargas lineales y 60/% de cargas no lineales como lámparas fluorescentes, rectificadores UPS, etc. La carga aplicada fue de 500W, la temperatura ambiente de 27°C y esta vez con un THD de 11.05%.

Tabla 13
Resultado de la prueba con carga no lineal

CARGA NO LINEAL					
Tiempo	Temperatura				Promedio
	X1	X2	X3	X4	
T0	19.4°C	18.8°C	19.4°C	19.2°C	19.2°C
T1	52.9°C	51.8°C	59.9°C	66.3°C	57.7°C
T2	66.8°C	65.2°C	67.5°C	78.2°C	69.4°C
T3	74.9°C	74.1°C	76.1°C	85.4°C	77.6°C
T4	77.8°C	72.1°C	78.7°C	86.8°C	78.9°C

Fuente: (UCSA, 2014)

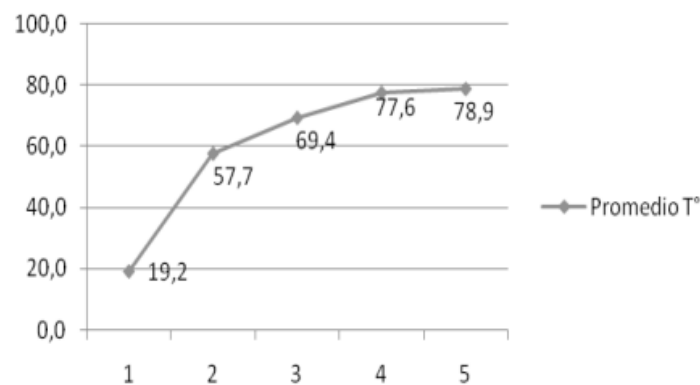


Figura 52. Promedio de temperatura para carga no lineal.

Fuente: (UCSA, 2014)

El incremento de la temperatura observado desde el inicio de la prueba fue de 59.7°C.

Eso nos muestra una diferencia de 10.6°C en comparación con la prueba anterior.

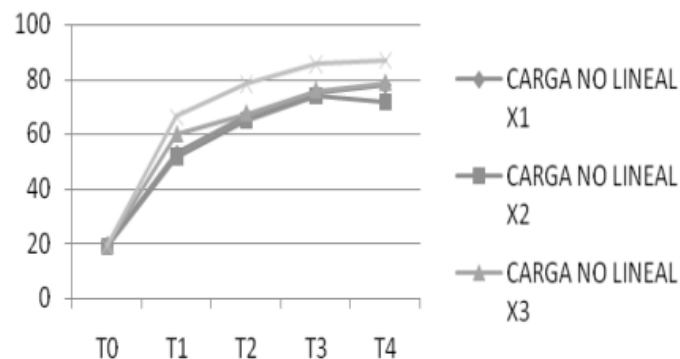


Figura 53. Temperatura del transformador por zonas 2.

Fuente: (UCSA, 2014)

Contraste de datos obtenidos

Se puede observar un aumento considerable de la temperatura en todos los puntos analizados.

Tabla 14

Comparación de temperaturas según la carga

Tiempo	Temperatura	
	Carga Lineal	Carga no Lineal
T0	19.4°C	18.8°C
T1	52.9°C	51.8°C
T2	66.8°C	65.2°C
T3	74.9°C	74.1°C
T4	77.8°C	72.1°C

Fuente: (UCSA, 2014)

El punto de mayor temperatura en el cual se registran mayor cantidad de pérdidas son los extremos de las bobinas.

La prueba evidencia como las cargas no lineales producen un efecto que es apreciable en el aumento de la temperatura durante el funcionamiento de los transformadores.

CAPITULO 4

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS LA INVESTIGACIÓN

El contenido de este trabajo se compilará en este apartado, donde se describirá conceptos ya desarrollados en la investigación, resultados y análisis. Esta información fue obtenida de fuentes bibliográficas relacionadas al tema en cuestión. Se buscará utilizar un lenguaje más sencillo y preciso para su apreciación.

4.1 Dimensionamiento de transformadores expuestos a armónicos

4.1.1 Cálculo del factor K

Teniendo en consideración las condiciones bajo las que van a ser expuestos los transformadores con cargas no lineales y por ende con corrientes armónicas, se utilizara el factor K con un valor mayor a 1 en lugar de sobredimensionar el transformador.

Las modificaciones que considera la utilización del factor K con respecto a los transformadores comunes son:

- Se aumenta las dimensiones del devanado primario para considerar las intensidades armónicas llamadas “triplen”. De igual manera se duplica las dimensiones del conductor neutro.

- En el diseño del núcleo se considera una densidad de flujo inferior al normalmente utilizado y esto se hace con un hierro silicoso de mayor grado.
- Se disminuye las dimensiones del devanado secundario utilizando conductores transpuestos y en paralelo para evitar el efecto skin.

Para hallar el factor K se realiza un análisis armónico de la intensidad generada por la carga. Se ha mencionado con anterioridad la expresión que nos proporciona el valor de K.

Según la Norma ANSI C57.110-1986 se establecen los factores K1, K4, K9, K13, K20, K30 y K40.

Tabla 15
Cargas con Factor K

Armónica	Hertz	K-4	K-13	K-20	K-30
1	60	100.000%	100.000%	100.000%	100.000%
3	180	16.667%	33.333%	41.667%	50.000%
5	300	10.000%	20.000%	25.000%	30.000%
7	420	7.143%	14.286%	17.857%	21.429%
9	540	5.555%	11.111%	13.889%	16.667%
11	660	4.545%	9.091%	11.364%	13.636%
13	780	3.846%	7.692%	9.615%	11.538%
15	900	3.333%	6.667%	8.333%	10.000%

Fuente: (TM2000, 2017)

En la Tabla 15 se observan valores para armónicos hasta de orden 15 con los factores K más utilizados. Los valores en porcentaje para cada armónico en esta tabla son referenciales, para un caso real pueden variar. Teniendo estos datos se puede determinar el factor K más adecuado.

Tabla 16
Factor *K* según carga.

CARGA	Valor de K
Luminaria incandescente, calefactores de resistencias, motores, transformadores de control, generadores.	K1
Lampara de descarga, calefactores inductivos, controladores de estado sólido, UPS con filtros.	K4
UPS sin filtros, equipos de telecomunicaciones.	K13
Servidores computacionales, controladores de estado sólido.	K20
Cables multifilares industriales y comerciales	K30
Otras cargas generadoras de gran cantidad de armónicos.	K40

Fuente: (Gouda, Amer y Salem, 2011)

En la Tabla 16 observamos el estudio hecho por *Gouda* para determinar los valores de K según el tipo de carga. Por ejemplo para K1 es fácilmente demostrable por formula que existe poca presencia de armónicos y que prevalece la fundamental. Esto se refleja en la carga que en gran medida es resistiva, cuando en la carga se encuentren mas componentes que generen armónicos, el factor K se ira incrementando.

Estos datos son referenciales y no deben considerarse como absolutos al decidir por la implementación de un transformador. Lo mas recomendable es hacer el estudio previo de los armónicos para calcular el factor K apropiado en cada caso.

La UL 1561 sugiere un procedimiento para la aplicar un factor K.

Se realiza una prueba con la frecuencia a la cual será sometido el transformador aplicándole una corriente con la intención de hallar las perdidas en el cobre y perdidas por dispersión de flujo. El factor K se multiplica por las pérdidas de dispersión y se suman a las perdidas por efecto Joule. Si la parte activa no eleva su temperatura por encima de la esperada esta preparada para operar con cargas no lineales con factor K igual o menores al propuesto.

Las normas que se utilizan para este dimensionamiento son:

- IEC 61378-1 Transformadores convertidores, Parte 1 Transformadores para aplicaciones industriales.

- IEEE C57.18.10 Practicas por semiconductores para trasformadores rectificadores de potencia.

A continuación, se presenta un ejemplo práctico que muestra cómo se calcula el factor K:

Un transformador alimenta a una carga no lineal consumiendo una intensidad de 1200 amperios, con el contenido armónico en p.u. mostrado en la siguiente figura se determinará el factor k.

Tabla 17

Tabla de armónicos vs corriente nominal

hn	ln(p.u.)
1	0.978
5	0.171
7	0.181
11	0.044
13	0.028
17	0.015
19	0.0098

Fuente: (ABB, 2005)

$$K = \sum_{k=1}^{n=\infty} \left[(I h_{N(p.u.)})^2 h_N^2 \right]$$

$$K = \sum_1^{19} [(0.978)^2(1)^2 + (0.171)^2(5)^2 + (0.108)^2(7)^2 + (0.044)^2(11)^2 + (0.015)^2(13)^2 + (0.0098)^2(19)^2]$$

$$K = 2.729$$

Este resultado significa que el transformador se calienta 2.729 veces más con la carga no lineal, que bajo el mismo valor producido por un valor RMS de corriente de una carga lineal.

4.1.2 Consideraciones del diseño del núcleo bajo carga de armónicos

En el núcleo expuesto a cargas no lineales se ven también expuesto a una componente de corriente continua que proviene de la carga, que incrementara las perdidas en el hierro mínimamente, pero aumentara considerablemente la intensidad de magnetización y el ruido.

Los núcleos normalmente se diseñan para trabajar en la rodilla de la curva de magnetización alcanzando entre 1.6T a 1.7 T. Si este núcleo estuviera operando con un 30% de sobretensión, la inducción generada en el circuito magnético alcanzaría entre 2T a 2.2T. lo que indica un elevado nivel de saturación. La inducción remanente al aislar el transformador de la carga alcanzara un valor de $2B_{max} + B_r$, equivalente a 3 veces el valor de operación y generando una inducción pico de entre 4T a 4.7T. La corriente magnetizando se incrementaría de 5 a 10 veces su valor de trabajo. La relación entre la tensión la frecuencia y la inducción de flujo de corriente en el núcleo se ve en la formula revisada en el capítulo 2 de este trabajo.

$$E = 4.44 f N B_m A 10^{-8} \text{volts}$$

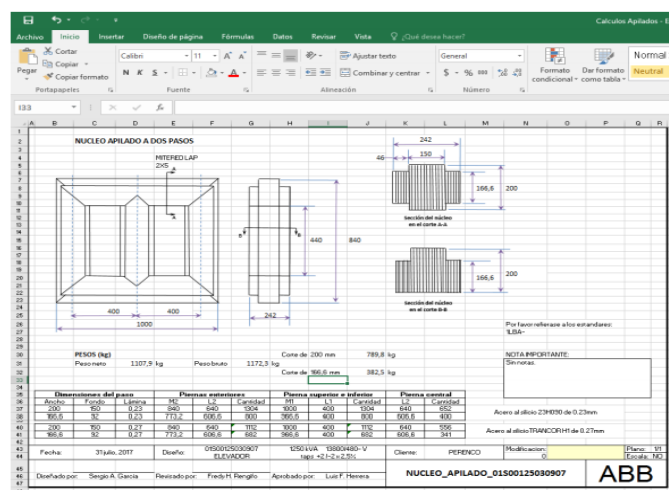


Figura 54. Hoja de cálculo para dimensionar el núcleo.

Fuente: (ABB, 2005)

Un transformador diseñado para operar con alterna y una frecuencia de 50Hz o 60Hz con una temperatura de trabajo no mayor a la ambiental, debe ser capaz de eliminar el calor

provocado por pérdidas y no elevar su temperatura poniendo en riesgo su estimación de tiempo operacional.

Cuando un transformador experimenta un pequeño aumento de voltaje, el núcleo al ya estar saturado genera un considerable aumento en su corriente de excitación y por ende aumentado sus componentes armónicas. Entonces, el diseño del núcleo debe considerar un valor de saturación del núcleo inferior a la convencional. El núcleo estará diseñado para trabajar con una densidad de flujo menor, con menos cantidad de hierro, pero de mejor calidad. Se recomienda el hierro silicoso M6.

4.1.3 Consideraciones del diseño de las bobinas bajo carga de armónicos

En las bobinas expuestas a corriente continua se genera un incremento de la temperatura debido al efecto Joule. Al incrementar la frecuencia de la intensidad, decrece el área útil de circulación ya que la densidad de intensidad aumenta en las proximidades de la superficie del conductor. A 60Hz este efecto puede no ser considerado y esto se debe a que en la construcción ya está considerado. Las corrientes con deformaciones generan pérdidas por efecto Joule con mayor importancia porque las componentes que distorsionan la fuente son de frecuencias mayores.

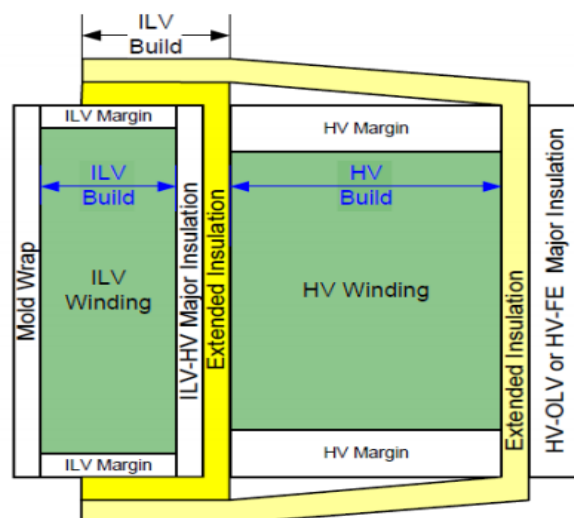


Figura 55. Aislamiento extendido para bobinas.

Fuente: (ABB, 2005)

Los devanados expuestos a efectos de armónicos deben tener un mayor aislamiento (Figura 55), principalmente si se trata de conductores de cobre ya que presenta mayor resistencia a las ocurrencias electromagnéticas.

- El Conductor en la bobina primaria se sobredimensiona para recibir las armónicas Triplen. Comúnmente se duplica el tamaño.
- En la bobina secundaria se utiliza conductores de menor calibre, en paralelo y transposición y de esta forma reducir el calor generado por el efecto skin.

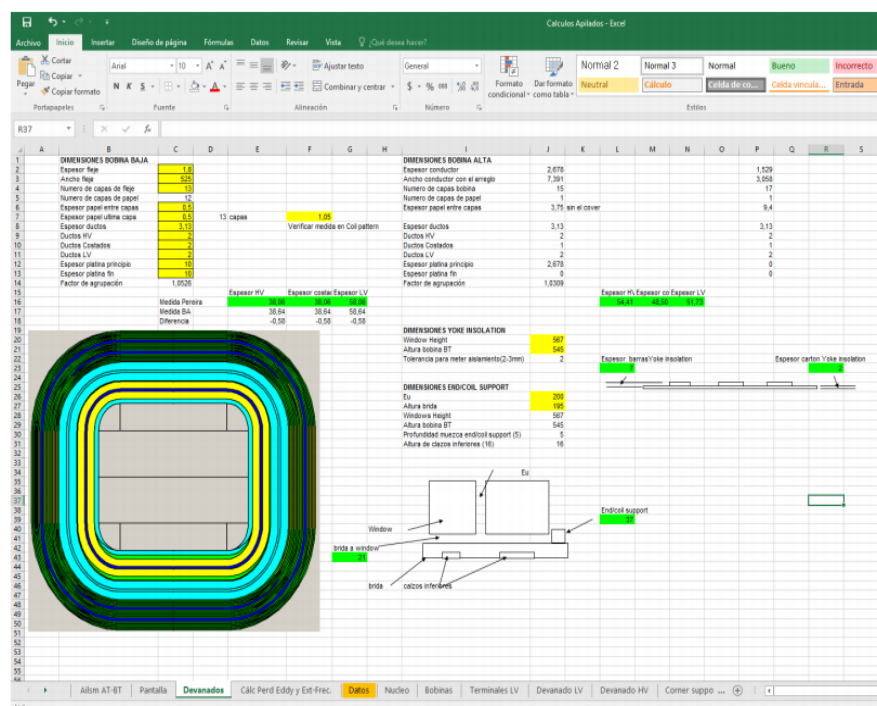


Figura 56. Hoja de cálculo para dimensionamiento de bobinas.
Fuente: (ABB, 2005)

4.1.4 Consideraciones del diseño de los neutros bajo carga de armónicos

En el supuesto que las cargas sean balanceadas, es en este punto llamado neutro donde las corrientes de secuencia positiva y secuencia negativa se cancelan. Esto provoca una saturación en los nodos. Las corrientes de secuencia cero denominadas Triplen no se cancelarán, por el contrario, se sumarán.

En un caso real, los conductores neutros conducen tanto corrientes positivas como negativas debido a las cargas desbalanceadas y las corrientes Triplen de secuencia cero.

El dimensionamiento de los conductores neutros debe ser tal que soporte la misma corriente de las fases ya que pueden saturarse debido a cargas no lineales. Por ello se sugiere que los conductores neutros tengan el doble del dimensionamiento de las fases.

4.1.5 Consideraciones del diseño de la pantalla electrostática

Actualmente para reducir los efectos de los armónicos en los transformadores se suele utilizar una pantalla electrostática. Esta pantalla atenúa las corrientes que tiene altas frecuencias, pero aumentan el tamaño de los bobinados y por ende del transformador.

Esta implementación requiere también de una conexión física a una tierra la cual debe ser realizada en forma cuidadosa para evitar adquirir potenciales elevados.

La importancia del neutro para la transmisión de la onda de choque de baja tensión. Sin considerar la transmisión capacitiva en el transformador, la onda de intensidad del impulso genera en la impedancia de tierra un voltaje que cuanto más grande, más inductiva será.

Económicamente la pantalla electrostática es beneficiosa para el cumplimiento de los objetivos cuando se encuentra bien dimensionada.

Los transformadores que están operando con variadores de velocidad mitigan las corrientes de frecuencias altas y es en estos casos donde, el fallo de la pantalla pueda ser dramático. Una mala instalación de la puesta a tierra de la pantalla puede inhibir su funcionalidad.

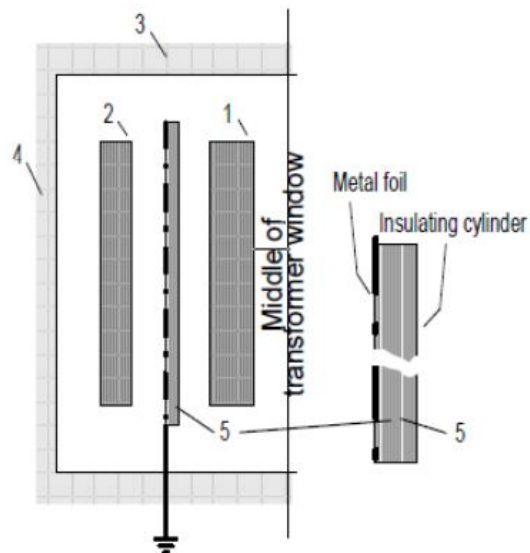


Figura 57. Ubicación de la pantalla electrostática.
Fuente: (ABB, 2005)



Figura 58. Falla en la pantalla electrostática.
Fuente: (ABB, 2005)

En la Figura 60 se observa una pantalla electrostática de un transformador que alimentaba un variador de velocidad, operando al 25% de su capacidad de carga activa y una frecuencia de conmutación de 3.2 kHz.

CONCLUSIONES

- ▶ En el desarrollo de la investigación se pudo revisar en las bibliografías, los diferentes efectos que causa las corrientes armónicas a cada uno de los componentes de los transformadores de potencia y que puede llevar a un desenlace crítico disminuyendo su tiempo de vida útil o su destrucción parcial o total. Con ello, se concluye que es de suma importancia la concientización del efecto causado por los armónicos eléctricos a los transformadores de potencia de M.T. y la consideración que debe tenerse en cuenta para el diseño y el requerimiento de los mismos con la finalidad de contrarrestar dichos efectos. Es así, que se debe hacer un estudio de calidad de las cargas para conocer el orden y la cantidad de armónicos que van a tener interacción con los transformadores y solicitar el adecuado para cada circuito.
- ▶ Con el estudio revisado acerca de los armónicos que se encuentran presentes en la red, se puede decir que van a depender de las cargas no lineales que se encuentren en el circuito. Los armónicos impares múltiplos de orden 3 ($3^{\circ}, 9^{\circ}, 15^{\circ} \dots$) se suman en el neutro y generan pérdidas en forma de calor.

- ▶ El dimensionamiento adecuado de los transformadores de potencia de M.T. se realiza conociendo la cantidad de armónicos al que va a ser expuesto y para ello es importante el cálculo del factor K, el cual representa la capacidad que dispone el transformador para interactuar con corrientes no sinusoidales. En el diseño de núcleo se considera un valor de magnetización del hierro menor para evitar la saturación y con ello las pérdidas. En el diseño de las bobinas se modifica las dimensiones de los conductores, incrementando para evitar el recalentamiento por el paso de corrientes armónicas; reduciéndolas, poniéndolas en paralelo y haciendo trasposición para evitar el efecto skin. De igual manera se aumenta las dimensiones de los neutros para preparar el paso de corrientes Triplen.
- ▶ Para mitigar los efectos causados por los armónicos en los transformadores de potencia de M.T. existen muchos métodos. Los filtros activos y demás equipos externos al propio transformador como mitigadores de armónicos, no han sido motivo de este estudio. La investigación se ha realizado sobre la interacción del propio transformador con los armónicos y como contrarrestarlos mediante métodos en su diseño. La pantalla electrostática colocada entre las bobinas primaria y secundaria y a su vez conectada a tierra es un implemento que da bastante resultado en los transformadores hoy en día.

BIBLIOGRAFIA

- ABB (2004) Transformadores de distribución tipo seco encapsulado al vacío, Catalogo ABB, 2004. Recuperado de http://personal.us.es/pedroj/ASInfo_Comun/Trafo_Seco.pdf
- ABB (2005) Transformadores de Distribución de Alta Potencia, ($> 2000\text{ kVA}$, hasta $72,5\text{ kV}$), Catalogo ABB, enero 2005. Recuperado de <http://jdelectricos.com.co/wp-content/uploads/2016/04/Transformadores-tipo-subestacion-ABB.pdf>
- Abundis Couoh, A. (2016). Causas y efectos de armónicos en sistemas eléctricos de potencia, Universidad Nacional Autónoma de México, facultad de Ingeniería, Ciudad de México. México.
- AESOLUCIONES (2018). Los efectos de los armónicos y sus soluciones. Recuperado de <https://agngroup.net/papers/boletin%20aes%20soluciones%20armonicos.pdf>
- Atalaya Sánchez, J., (2010). Efecto de los armónicos en transformadores de distribución. Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/9601>
- Avelino, P. (2001). Transformadores de distribución: Teoría, cálculo, construcción y pruebas. D.F, México: Reverté.
- Baldeón J. (2018). Introducción a los sistemas de protección. Presentación en Power Point, clase de Protección de sistemas de Potencia, UTP, Lima.
- Barcón, S., Guerrero, R., Martínez, I. (2012). Calidad de la energía: factor de potencia y filtrado de armónicas. D.F, México: Apolo.
- Barrios, L. (1994) Historia de las Máquinas Eléctricas, Primera edición, vol. I, Barcelona: Ediciones UPC, pp. 189-207

- Camarena P. (1980). Transformadores eléctricos industriales: Reparación diseño y construcción. D.F, México: Continental.
- CENTELSA (2018). Cables para Media y Alta tensión. Recuperado de <http://www.centelsa.com/pdf/Cables-Media-alta-Tension.pdf>
- CIRCUITOR (2018). Efecto de los armónicos en el sistema de potencia. Recuperado de <http://circuitor.es/es/formacion/armonicos-electricos/efecto-de-los-armonicos-en-el-sistema-de-potencia>
- COES (2018). Programa de mantenimiento. Recuperado de <http://www.coes.org.pe/Portal/Operacion/ProgManten/ProgSemanal>
- Corrales, J (1969). Teoría, calculo y construcción de transformadores. Barcelona, España: Labor.
- DINAMIK. (2018). Transformador IG norma CFE y particulares. Recuperado de <http://dinamik.mx/catalogo/producto/transformador-ig-norma-cfe-y-particulares/>
- ECUATRAN. (2018) Transformadores de distribución. Recuperado de <http://www.ecuatran.com/es/transformadores/>
- Enríquez, G. (2005). Curso de transformadores y motores de inducción. D.F, México: Limusa.
- Ferracci, Philippe (2004). La Calidad de la Energía Eléctrica, Cuaderno Técnico N°199, Schneider Electric.
- Fraile, J. (2015). Maquinas eléctricas. Madrid, España: Ibergaceta.
- FULLWAT (2018). ¿Que es el factor de potencia? Recuperado de <http://www.fullwat.com/documentos/00304-LNK04131.pdf>
- Gouda O., E.; Amer, G.M. y Salem, W.A.A. (2011). A Study of K-Factor Power Transformer Characteristics by Modeling Simulation. Engineering, Technology & Applied Science Research, 1(5), 114-120.
- IEEE (1993). Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Systems. IEEE Industry Applications Society/Power Engineering Society, IEEE Std. 519-1992, New York.
- INDUCOR (2015). Efecto de las armónicas en transformadores y motores. Recuperado de <http://www.inducor.com.ar/academicos/calculo-de-maquinas-electricas/maquinas-electricas-capitulo20.html>
- Iñaki (2015). Armónicos en sistema de distribución eléctrica. Recuperado de <https://transmisionelectrica.wordpress.com/2015/07/10/armonicos-en-sistemas-de-distribucion-electrica/>
- ISEESAC (2019). Influencia de cargas no lineales en transformadores de distribución Recuperado de <https://www.iseesac.com/nueva/>
- ISSU (2017). Efecto skin en conductores. Recuperado de <https://issuu.com/citeenergia/docs/efecto-skin-conductores>

- López, L., Palau S. (2017). Dimensionamiento de transformadores de distribución con base al efecto de los armónicos.
- Perdomo García, M. (2016). Implementación de pruebas de rutina para el diagnóstico de THD en transformadores con cargas armónicas. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/71399250.pdf>
- Pineda Espinosa, U. (2008). Mitigación de efectos producidos en los transformadores de distribución por el uso de cargas eléctricas.
- Politécnico de Torino, (1990). Dal laboratory di Galileo Ferraris. Recuperado de http://iee.azc.uam.mx/ilg/tms/Articulo_Historia_del_Transformador.pdf
- QUATUM ELECTRIC. (2018) Transformador tipo poste trifásico. Recuperado de <http://www.quantumelectric.com.mx/transformador-tipo-poste-trifasico/>
- Reyes Calderón, G. (1996). Armónicas en Sistemas de Distribución de Energía eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de ingeniería Mecánica y Eléctrica.
- Rosales Padilla, O. (1995). Estudio de frecuencias armónicas.
- Schneider Electric. (1998). Información Técnica, Generalidades sobre Armónicos. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/63495117/Generalidades-sobre-los-armonicos-en-sistemas-de-distribucion-de-energia>
- Serrano, Víctor. (2001). Electricidad y magnetismo, estrategias para la resolución de problemas y aplicaciones, editora Novedades SA, Tomo II.
- Téllez E. (2000). Automatización, productividad y calidad. Distorsión armónica. Recuperado de <https://agngroup.net/papers/Distorsion%20Armonica.pdf>
- TM2000 (2017). Factor K. Recuperado de http://www.tm2000.com.mx/?page_id=117
- UCSA (2014). Incidencias de Cargas No Lineales en Transformadores de Distribución. Recuperado de <http://scielo.iics.una.py/pdf/ucsa/v1n1/v1n1a05.pdf>
- Universidad de Michoacán. (2003). Modelado y análisis de sistemas eléctricos bajo condiciones de operación no senoidales. Recuperado de <https://es.slideshare.net/ibrazar/52983063-seriesdefourier/35>.

ANEXO 1

ANEXO 2

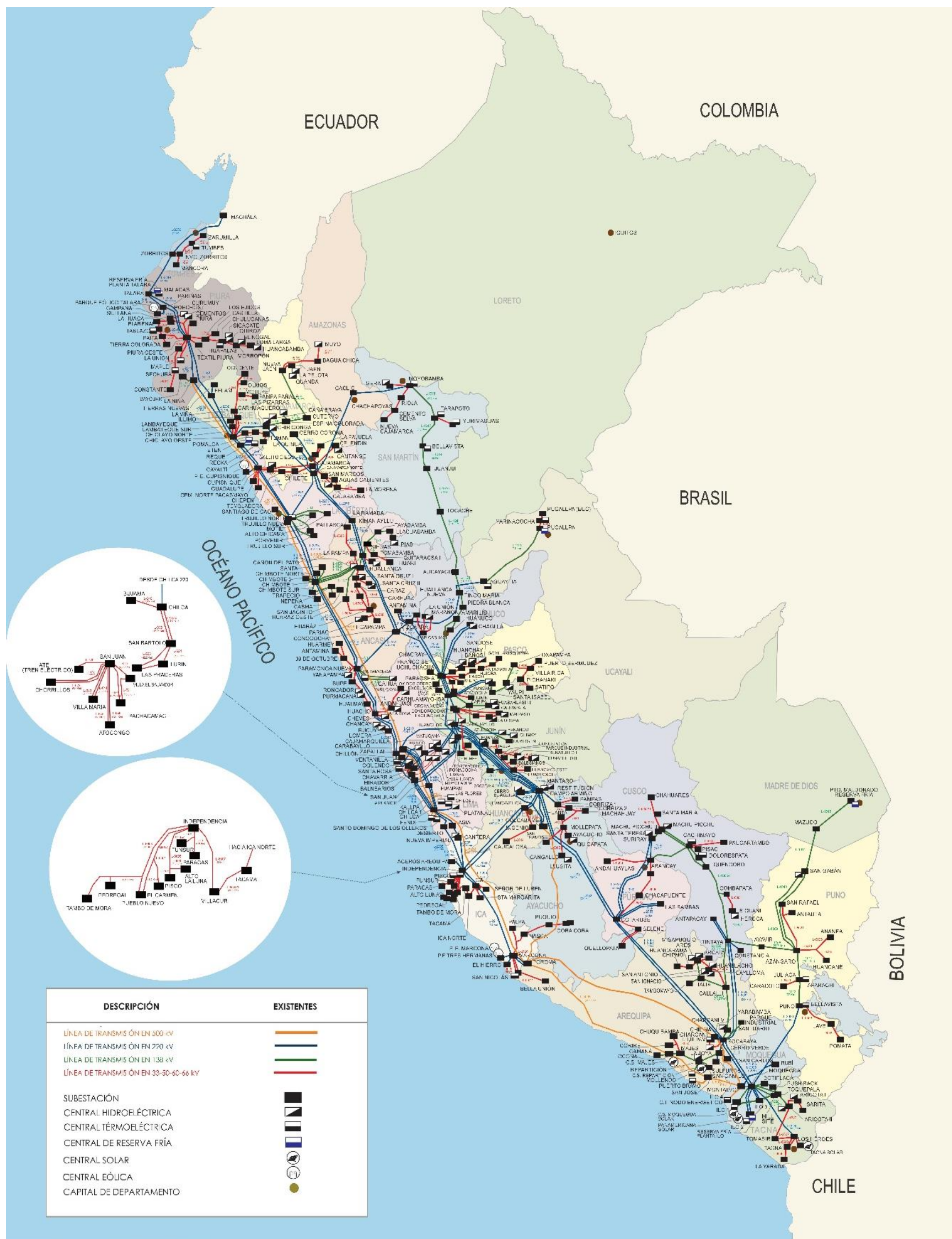


Figura 60. Sistema interconectado nacional.
Fuente: (COES, 2017)